



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JUSSI KIVELÄ  
IHMINEN-ROBOTTI YHTEISTOIMINTASOVELLUKSEN  
SUUNNITTELU

Diplomityö

Tarkastaja: professori Minna Lanz  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
28. helmikuuta 2018

# TIIVISTELMÄ

**JUSSI KIVELÄ:** Ihminen-robotti yhteistoimintasovelluksen suunnittelu

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 51 sivua

Toukokuu 2018

Konetekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Tuotantotekniikka- ja automaatio

Tarkastaja: professori Minna Lanz

Avainsanat: ihminen-robotti yhteistoimintasovellus, robotiikka, tuotanto

Tämän diplomityön päätavoitteena on laatia työn teettäjäyritykselle suositus erääseen tuotantovaiheeseen parhaiten soveltuvimmasta ihminen-robotti yhteistoimintatavasta. Yhteistoimintatavan soveltuvuutta arvioitaessa kriteereinä ovat yhteistoimintasolun turvallisuus, tehokkuus sekä käyttömukavuus.

Työn teoriaosuudessa tutkitaan erilaisten ihminen-robotti yhteistoimintatapojen teoriaa ja selvitetään yhteistoimintasovelluksen suunnitteluun liittyviä asioita. Varsinainen kokeellinen osuus koostuu kahdesta osiosta. Ensimmäisessä osiossa tutkitaan kokeellisin menetelmin Universal Robots 10-robotin pysähtymissuorituskykyä puristusta aiheuttavan törmäystilanteen yhteydessä. Mittauksia varten rakennetaan erillinen voima-anturilla varustettu mittalaite. Tutkimusosuuden toisessa osiossa luodaan robotin pysähtymissuorituskyvylle matemaattinen malli, jonka avulla robotille voidaan laskea pysähtymisaika eri kuormaus tilanteelle.

Kokeellisen osuuden tulosten perusteella annetaan suositus tuotantovaiheeseen parhaiten soveltuvimmasta yhteistoimintatavasta ja luodaan ehdotus ihmisen ja robotin yhteistoimintaan perustuvasta tuotantosolusta. Lisäksi arvioidaan projektin aikana havaittuja yhteistoimintasovellusten hyötyjä sekä yhteistoimintasovelluksen suunnittelua monimutkaistavia asioita.

## **ABSTRACT**

**JUSSI KIVELÄ:** Human-robot collaboration work cell planning

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 51 pages

May 2018

Master's Degree Programme in Mechanical engineering

Major: Production engineering and automation

Examiner: Professor Minna Lanz

Keywords: human-robot collaboration, robotics, production

The aim in this Master's Thesis is to create a proposal how human-robot collaboration can be utilized in a production phase. The most suitable human-robot collaboration operation is defined by analysing its effectivity, user-friendliness and safety.

In theory section different human-robot collaboration operations and the basis for human-robot collaboration work cell planning are evaluated. The actual research section consists two different topics. Firstly experimental research methods are used to evaluate Universal Robots 10 behaviour in case of quasistatic collision. A force measuring device is designed and manufactured for the measurements. Secondly a mathematical model is created for the robot stopping performance. The model is used to define stopping times for different payloads.

By using the results from the research section the most suitable human-robot collaboration method is chosen and the proposal of the work cell is designed. In addition human-robot collaboration cons and pros are evaluated.

## ALKUSANAT

Tämän diplomityöprojektin aikana itse kirjoittaminen meinasi jäädä muiden työtehtävien varjoon, mutta työn tarkan rungon hahmottumisen jälkeen tämäkin projekti saatiin naputettua päätökseen vielä ennen kevään ensimmäisen hellejakson päättymistä.

Suuri kiitos kaikille Vaisalalaisille, jotka ovat projektiin tavalla tai toisella osallistuneet. Erityismaininta työn ohjaajana toimineelle Tomi Pietarille projektin aikaisesta avusta sekä mahdollisuudesta työn tekemiseen.

Yliopiston puolella kiitokset Jyrki Latokartanolle työn aikaisesta ohjauksesta sekä Minna Lanzille työn tarkastamisesta ja rakentavan palautteen antamisesta.

Hennalle iso kiitos kannustuksesta sekä kaikista niistä ruuanlaittokerroista, joista olen luistanut diplomityön kirjoittamisen verukkeella. Kiitoksia myös vanhemmilleni 18 vuotta kestäneen koulutien aikaisesta tuesta.

Helsingissä 4.5.2018

Jussi Kivelä

# SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
1.1	Työn taustat .....	1
1.2	Tutkimuskysymykset ja työn tavoitteet .....	2
1.3	Tutkimusmenetelmät .....	2
2.	TEORIAOSUUS .....	4
2.1	Ihminen-robotti yhteistoimintasovellusten kehitys .....	4
2.2	Konedirektiivi .....	5
2.3	Robotin pysähtymistoiminnot .....	6
2.4	Yhteistoimintatavat .....	6
2.4.1	Turvaluokiteltu valvottu pysähdys .....	7
2.4.2	Käsin ohjaaminen .....	7
2.4.3	Nopeuden ja vähimmäisetäisyyden valvonta .....	8
2.4.4	Tehon ja voiman rajoittaminen .....	11
2.5	Yhteistoimintasovelluksen suunnittelu .....	14
2.5.1	Yhteistoimintasovelluksen turvallisuuden perusteet .....	14
2.5.2	Törmäysvoiman mittaaminen .....	17
2.5.3	Suojaetäisyyksien määrittäminen .....	18
2.5.4	Työntekijöiden huomioiminen suunnittelussa .....	19
3.	KOKEELLINEN OSUUS .....	20
3.1	Kokeellinen tutkimus .....	20
3.2	Matemaattinen mallintaminen .....	24
4.	TULOKSET .....	28
4.1	Kokeellisen tutkimuksen tulokset .....	28
4.2	Matemaattisen mallintamisen tulokset .....	30
5.	JOHTOPÄÄTÖKSET .....	31
5.1	Tulosten analysointi .....	31
5.2	Suositus yhteistoimintasovelluksen toteutuksesta .....	36
5.2.1	Suositus yhteistoimintatavasta .....	36
5.2.2	Suositus yhteistoimintasolusta .....	38
5.3	Yhteistoimintasovelluksen hyötyjen arviointi .....	43
5.4	Yhteistoimintasovelluksen suunnittelun haasteet .....	44
5.5	Tutkimuksen toteutuksen arviointi ja tutkimustavoitteiden täyttyminen .....	44
5.6	Jatkotutkimuskohteet .....	45
6.	YHTEENVETO .....	47
	LÄHTEET .....	48

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

UR	Universal Robot
UR10	Universal Robot 10
ISO	International Organization for Standardization, eli kansainvälinen standardisoimisjärjestö
DGUV	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung
TCP	Tool Center Point, eli robotin määritetty työkalupiste. Ensisijaisesti tämä piste on robotin työkalulaipan keskellä.
SFS	Suomen Standardisoimisliitto
PLC	Programmable Logic Controller

# 1. JOHDANTO

Tässä luvussa kuvaillaan työn taustat, käydään läpi tavoitteet ja tutkimuskysymykset sekä määritetään käytettävät tutkimusmenetelmät.

## 1.1 Työn taustat

Vaisala on mittalaitteisiin ja mittajärjestelmiin erikoistunut suomalainen pörssiyritys. Vaisalan tuotteita käytetään ympäristön sekä lukuisten erilaisten teollisuuden sovellusten mittaamiseen. Vaisalan tuoteportfolio sisältää yli 6000 tuotetta lukuisilla tilauskohtaisilla räätälöintimahdollisuuksilla. Tuotekohtaiset tuotantomäärät ovat kuitenkin varsin pieniä. Tuotteet valmistetaan asiakkaan tilauksesta, joten nopeat läpimenoajat ovat Vaisalan tuotannossa erittäin tärkeitä. Vaisalan tuotanto on pienistä tuotantomääristä johtuen pääosin manuaalista. Tuotteiden varioituvuudesta johtuen kokoonpanon automatisointi on pääosin haastavaa, mutta automaatiolle löytyy kuitenkin käyttöä muun muassa työvaiheista, joissa tuotetta siirrellään eri prosessilaitteiden välillä.

Tämän diplomityön tarkoituksena on antaa suositus erään tuotantoprosessin työvaiheen osittaisesta automatisoinnista. Työvaiheen siirtelyosion automatisointia on Vaisalassa harkittu jo aiemmin, jolloin suunnitelmassa oli käyttää tuotteiden siirtämiseen kiinteästi asennettuja lineaarikiskoja. Tämän ratkaisun todettiin olevan liian jäykkä jatkuvasti muuttuvan tuotannon tarpeisiin, minkä johdosta automatisointihanke hylättiin. Työvaiheen siirtelyosion automatisoinnin suunnittelu aloitettiin kuitenkin uudelleen kesällä 2017 allekirjoittaneen toimesta tehdyn tutkimuksen perusteella, jossa tutkittiin automatisoinnin mahdollisuuksia 6-akselista robottia ja konenäköä hyväksikäyttämällä. Kesän 2017 loppupuolella tehtiin myös päätös automatisointiprojektin aloittamisesta, mikä toimi lähtölaukauksena tälle diplomityöprojektille. Aikaisempien käyttökokemusten, kevytrakenteisuuden, pienen tilavaatimuksen ja ulottuvuuden perusteella automatisointiprojektissa käytettäväksi robotiksi valikoitui standardin SFS-EN ISO 10218-1 mukainen teho- ja voimarajoitettu Universal Robots 10-robotti.

Työvaiheen osittainen automatisointi yhteistoimintasovelluksena on järkevää, koska työvaiheessa on sekä robotin että ihmisen vahvuuksia vaativia työtehtäviä. Työvaiheessa tapahtuu sekä tuotteen kokoonpano että myös tuotteen siirtely lukuisiin prosessilaitteisiin. Tuotteen kokoonpaneminen vaatii erityistä sorminäppäryyttä sekä komponenttien laaduntarkkailua, joten tämä työtehtävä on järkevää antaa ihmisen vastuulle. Tuotteiden siirtely prosessilaitteiden välillä sen sijaan on nopeutta ja tarkkuutta vaativaa toistotyötä, jossa robotti pääsee hyödyntämään omia vahvuuksiaan.

Tuotantoprosessin luonne aiheuttaa yhteistoimintasolulle erinäisiä vaatimuksia. Materiaalin siirtymisen operaattorin ja robotin välillä tulee olla joustavaa. Operaattorin tulee pystyä joustavasti lastaamaan tuotteita varastoalueelle robotin siirreltäväksi ja vastaavasti poistamaan valmiita tuotteita varastoalueelta robotin toimintaa häiritsemättä. Riittävän nopean tahtiajan takaamiseksi robotille pitää pystyä helposti erottamaan oma työalueensa, jolla robotti voi liikkua nopeammin ja käyttää suurempia kiihtyvyyksiä kuin mitä yhteistoiminta-alueella käytetään. Operaattorin tulee myös pystyä kokoonpanemaan tuotteita varastoalueen välittömässä läheisyydessä, jotta ylimääräisiin siirtelyihin kuluu mahdollisimman vähän aikaa.

## 1.2 Tutkimuskysymykset ja työn tavoitteet

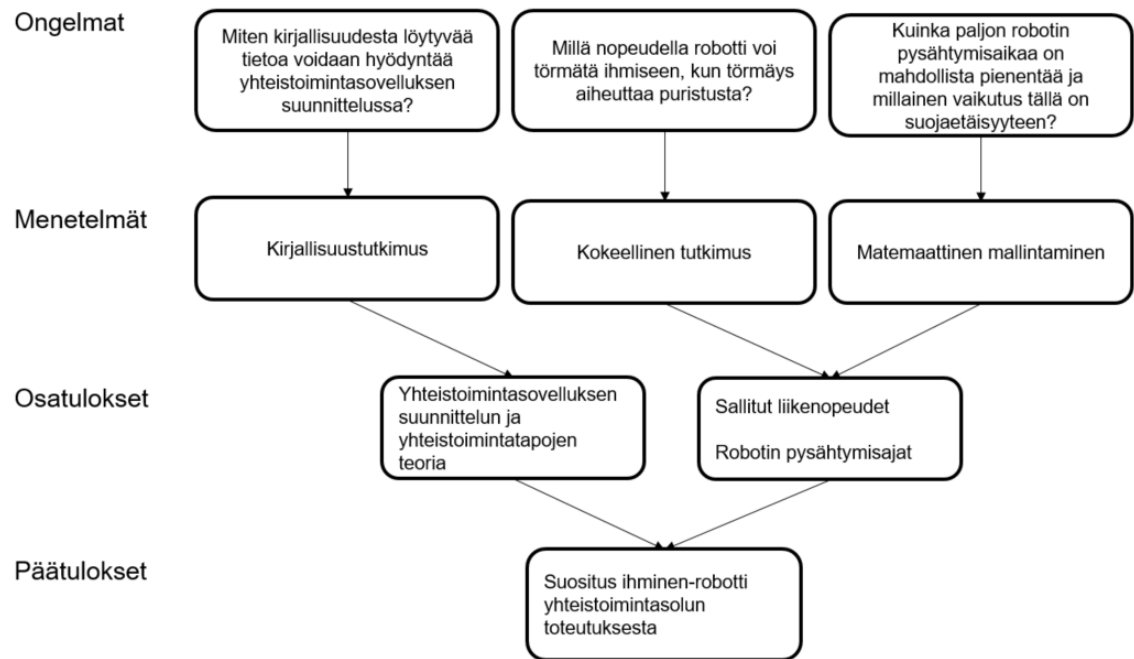
Tämän diplomityön päätavoitteena on laatia Vaisalalle suositus ihminen-robotti yhteistoimintasolun toteuttamistavasta. Toteuttamistavalla tarkoitetaan tässä kohtaa yhteistoimintasolussa käytettävän yhteistoimintatavan valintaa sekä yhteistoimintasolun pohjapiirustusehdotuksen laatimista. Päätavoite saavutetaan ratkaisemalla kolme tutkimusongelmaa, jotka määritettiin seuraavasti:

1. Miten kirjallisuudesta löytyvää tietoa voidaan hyödyntää yhteistoimintasovelluksen suunnittelussa?
2. Millä nopeudella robotti voi törmätä ihmiseen, kun törmäys aiheuttaa puristusta?
3. Kuinka paljon robotin käyttöohjekirjassa annettua pysähtymisaikaa on mahdollista pienentää ja millainen vaikutus tällä on suojaetäisyyteen?

## 1.3 Tutkimusmenetelmät

Työssä käytetään tutkimusmenetelminä kirjallisuustutkimusta, kokeellista tutkimusta sekä matemaattista mallintamista. Kirjallisuustutkimuksessa tutkitaan yhteistoimintasovelluksen suunnittelun ja yhteistoimintatapojen teoriaa. Kokeellisella tutkimuksella selvitetään, millaisella nopeudella robotin on sallittua törmätä ihmiseen, kun törmäys aiheuttaa puristusta. Lisäksi määritetään Universal Robots 10-robotille uudet pysähtymisajat käyttämällä tutkimusmenetelmänä matemaattista mallinnusta. Tutkimusosion osatuloksina muodostuu yhteistoimintasovelluksen suunnittelun ja yhteistoimintatapojen teoria sekä tietoa yhteistoimintavan valintaan ja suunnitteluun. Lopullisena työn tuloksena tehdään valinta Vaisalan tuotantovaiheessa käytettävästä yhteistoimintatavasta ja annetaan ehdotus yhteistoimintasolun toteutuksesta. Tutkimuksen rakenne esitetään kuvassa 1.





**Kuva 1.** Tutkimuksen rakenne

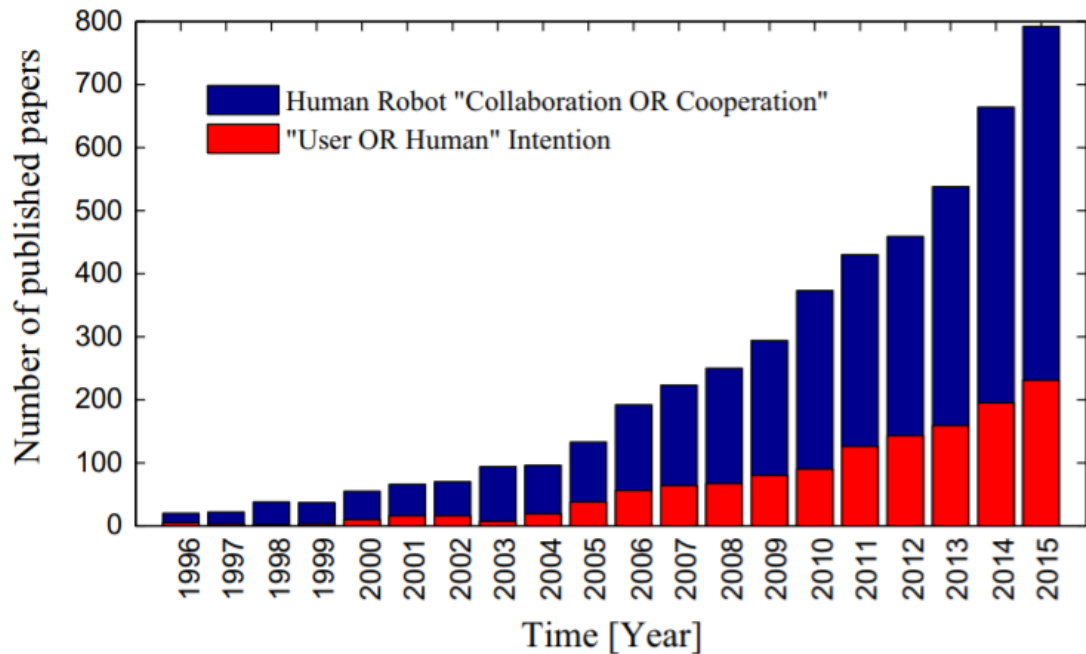
## 2. TEORIAOSUUS

Tässä luvussa suoritetaan kirjallisuustutkimus ihmisen ja robotin yhteistoiminnan turvallisuuteen ja erilaisiin yhteistoimintatapoihin liittyvistä asioista.

### 2.1 Ihminen-robotti yhteistoimintasovellusten kehitys

Ensimmäiset teollisuusrobotit olivat hydraulitoimisia ja aiheuttivat voimakkuutensa ja kokonsa takia monia riskejä tehtaassa työskenteleville ihmisille. Turvallisuusriskien minimoimiseksi robotin työalue päätettiin rajata aidoilla. Teollisuudessa oli kuitenkin tarvetta teollisuusrobottien turvallisuuteen liittyvälle ohjeistukselle, joten Yhdysvalloissa ja Euroopassa alettiin luoda turvamääräyksiä teollisuusroboteille. Ensimmäiset teollisuusroboteille luodut turvallisuustandardit olivat vuonna 1992 julkaistut ANSI/RIA R15.06-1992 ja ISO 10218:1992. Robottien teknologia jatkoi edellä mainittujen standardien julkaisemisen jälkeen kehittymistään ja esimerkiksi uudet servo-ohjaukset laajensivat teollisuusrobottien käyttömahdollisuuksia. Robotit pidettiin edelleen aitojen takana, mutta mielenkiinto ihmisen ja robotin välisen interaktion parantamiseen oli kasvamassa. (Fryman & Matthias 2012)

Vuosituhaten vaihteen jälkeen kiinnostus ihmisen ja robotin välisen interaktion kehittämisen mahdollistavaa teknologiaa kohtaan kasvoi (Hägele et al. 2002; De Santis et al. 2008). Robottien ohjausjärjestelmät olivat kehittyneet niin paljon, että turvallisuusstandardeja alettiin päivittää antamaan parempaa ohjeistusta ihmisen ja robotin yhteistyöhön (Fryman & Matthias 2012). Päivityksen tuloksena syntyi robottivalmistajille suunnattu ISO 10218-1:2006, jossa ihmisen ja robotin yhteistyö oli huomioitu aiempaa paremmin (Fryman & Matthias 2012). Ihmisen ja robotin yhteistoimintaa koskevan kiinnostuksen kasvu nähdään myös ihminen-robotti yhteistoimintasovelluksia koskevien julkaisujen määrässä. Esimerkiksi Helms et al. (2002) esitti vuonna 2002 robottiapulaisen, joka pystyy avustamaan työntekijöitä hydraulipumpun kokoonpanon sekä manuaalisen hitsauksen yhteydessä. Schraft et al. (2005) puolestaan esittivät vuonna PowerMaten, joka pystyy toimimaan yhteistyössä ihmisen kanssa erilaisissa kokoonpano- ja ojennustehtävissä. Kuvassa 2 esitetään ihminen-robotti yhteistoimintasovelluksia koskevien julkaisujen määrän kehitystä.



**Kuva 2.** Ihmisen ja robotin välistä yhteistoimintaa käsittelevien julkaisujen kehittyminen (Ajoudani et al. 2018).

Krüger et al. (2009) mukaan tuotannon joustavuusvaatimukset tulevat tulevaisuudessa kasvamaan, sillä tuotanto on siirtymässä kohti varioituvampia tuotteita. Joustavuusvaatimusten kasvaminen tulee tulevaisuudessa vähentämään täysin automatisoitujen tuotantolinjojen rakentamista (Krüger et al. 2009; Fryman & Matthias 2012; Rosenstrauch & Krüger 2017). Esimerkiksi Saksan teollisuudessa noin kolmannes korkea-asteiseen automaatioon investoineista yrityksistä on todennut tuotannon joustavuuden kärsineen (Bley et al. 2004). Lisääntyvään joustavuuden tarpeeseen on mahdollista vastata joustavilla ihminen-robotti yhteistoimintasovelluksilla (Krüger et al. 2009; Fryman & Matthias 2012; Rosenstrauch & Krüger 2017).

## 2.2 Konedirektiivi

Konedirektiiviin 2006/42/EY liittyy useita erilaisia turvallisuusstandardeja, jotka jaotellaan A-, B- ja C-tyypin standardeihin. Koneturvallisuutta käsiteltäessä tämän kolmiportaisen hierarkian ensimmäisen portaan, A-tyypin, standardi on SFS-EN ISO 12100, jossa käydään läpi riskinarviointia ja turvallisuussuunnittelun perusasioita. Seuraavan portaan, B-tyypin, standardit antavat ohjeistusta esimerkiksi ergonomiaan, turvalaitteisiin, suojauksiin ja turvaetäisyyksiin liittyviin suunnittelutehtäviin. Viimeisen portaan, C-tyypin, standardit antavat kaikkein yksityiskohtaisempaa tietoa kunkin koneen turvallisuusvaatimuksista. (SFS ry 2015)

Standardit SFS-EN ISO 10218-1 ja SFS-EN ISO 10218-2 ovat harmonisoituja C-tyypin standardeja ja ne antavat yksityiskohtaista ohjeistusta robottijärjestelmän suunnitteluun.

Nämä standardit kuitenkin käsittelevät ihmisen ja robotin yhteistoimintaa varsin pintapuolisesti. Tarkempaa tietoa yhteistoiminnasta annetaan teknisessä spesifikaatiossa ISO/TS 15066. Teknisessä spesifikaatiossa kuitenkin todetaan, että teho- ja voimarajoitetuilla roboteille annetut voima- ja painearvot ovat vain suuntaa antavia suosituksia. (Salmi et al. 2016)

## 2.3 Robotin pysähtymistoiminnot

Robotin pysähtymistoiminnot ovat tärkeä osa yhteistoimintasovelluksen suunnittelua, sillä jokainen yhteistoimintatapa perustuu joko kokonaan robotin pysähtymiseen tai sitten pysähdys on olennainen osa yhteistoimintaprosessia. Standardissa SFS-EN 60204-1 koneen pysähtymistoiminnot jaetaan kolmeen luokkaan:

1. Luokassa 0 pysäyttäminen tapahtuu poistamalla virta robotilta välittömästi. Pysähdys on näin ollen valvoton, joten robotti voi ajautua ohjelmoidulta radalta sivuun, sillä kaikki nivelet jarruttavat mahdollisimman nopeasti. Tätä pysähtymistoimintaa voidaan käyttää esimerkiksi tilanteessa, jossa jokin turvajärjestelmän osa vikaantuu. (SFS-EN 60204-1 2006)
2. Luokan 1 pysähdys on valvottu, mikä tarkoittaa sitä, että virta säilytetään robotilla kunnes pysähtyminen on suoritettu. Tämän jälkeen virta katkaistaan. Pysähdys on valvottu, joten robotti pysyy ohjelmoidulla radallaan. Tämä pysäytystapa on käytössä yleensä hätäpysäytystoiminnoissa. (SFS-EN 60204-1 2006)
3. Luokan 2 pysäytystoiminnoissa pysähtyminen suoritetaan valvotusti ja toimilaitteella säilytetään teho pysähtymisen jälkeen (Universal Robots Safety FAQ; SFS-EN 60204-1 2006). Universal Robots käyttää tätä pysähtymistoimintaa esimerkiksi törmäystilanteessa (Universal Robots Safety FAQ). Tässä pysäytystoiminnoissa turvaluokiteltu ohjausjärjestelmä valvoo, että robotti ei liiku (Universal Robots Safety FAQ; SFS-EN 60204-1 2006).

Robotin pysähtymistoiminnot voivat olla erilaisia riippuen robottimallista ja robotin ajotiloista. Mikäli robotti tarjoaa erilliset ajotilat opetukseen ja automaattiajoon, voi suoritettava pysähdys olla erilainen eri ajotiloissa. Esimerkiksi hätäpysäytyspainikkeen painaminen opetustilassa voi kytkeä luokan 0 pysähdystoiminnon, mutta automaattitilassa luokan 1 pysähtymistoiminnon. (Marvel & Norcross 2017)

## 2.4 Yhteistoimintatavat

Tässä luvussa käydään läpi standardin SFS-EN ISO 10218-2 määrittelemät neljä tapaa ihmisen ja robotin yhteistoimintaan. Näitä tapoja ovat turvaluokiteltu valvottu pysähdys, käsiohjaus, nopeuden ja vähimmäisetäisyyden valvonta sekä tehon ja voiman rajoitus (SFS-EN ISO 10218-2 2011).

### 2.4.1 Turvaluokiteltu valvottu pysähdys

Käytettäessä yhteistoimintatapana turvaluokiteltua valvottua pysähdystä robotti voi liikkua vapaasti, kun yhteistoiminta-alueella ei ole ihmisiä (SFS-EN ISO 10218-2 2011). Robotin tulee suorittaa turvaluokiteltu valvottu pysähdys ennen ihmisen siirtymistä yhteistoiminta-alueelle (SFS-EN ISO 10218-2 2011). Turvaluokiteltu valvottu pysähdys on tila, jossa robotti pysähtyy, mutta robotin käyttövoima pysyy kytkettynä turvaluokitellun valvontajärjestelmän varmistamiseksi, että robotti ei liiku (ISO/TS 15066 2016). Ihmisen poistuttua yhteistoiminta-alueelta robotti voi jatkaa toimintaansa automaattisesti (ISO/TS 15066 2016). Yhteistoiminta-alueen suunnittelussa on tärkeää varmistaa, että standardissa SFS-EN ISO 13855 suojaetäisyydelle asetetut vaatimukset täyttyvät (ISO/TS 15066 2016). Turvaluokitellun valvotun pysähdyksen tapahduttua ihminen saa siirtyä yhteistoimintatilaan, mikäli yhteistoimintatilassa ei ole ihmiselle vaaraa aiheuttavia riskejä, turvaluokiteltu valvottu pysähdys pysyy aktiivisena kunnes ihminen poistuu yhteistoimintatilasta ja robotti täyttää standardin SFS-EN ISO 10218-1 kohtien 5.4 ja 5.5.3 vaatimukset (ISO/TS 15066 2016). Turvaluokiteltu valvottu pysähdys on esitetty kuvassa 3



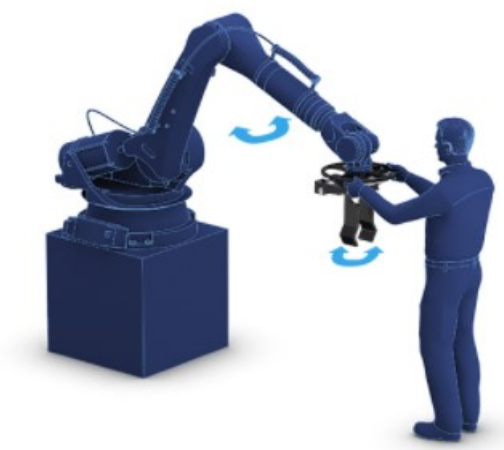
*Kuva 3. Turvaluokiteltu valvottu pysähdys (Schunk)*

### 2.4.2 Käsin ohjaaminen

Robotin manuaalinen liikuttelu voi olla tarpeellista esimerkiksi raskaiden kappaleiden kokoonpanotehtävissä sekä robotin liikeratojen opettamisen yhteydessä. Ihmisen aloittaessa robotin ohjauksen käsiohjauslaitteen välityksellä turvaluokiteltu valvottu pysähdys kuitaantuu, jolloin operaattori voi suorittaa tarvittavat liikkeet käsiohjauksella (ISO/TS 15066 2016). Ihmisen siirtyessä pois yhteistoimintatilasta robotti voi jatkaa normaalia toimintaansa automaattisesti (ISO/TS 15066 2016).

Robotin ohjaaminen käsin on sallittua ainoastaan tiukkojen vaatimusten täyttyessä. Ensimmäisenä vaatimuksena robotin tulee suorittaa turvaluokiteltu valvottu pysähdys

ennen käsiohjaukseen siirtymistä (SFS-EN ISO 10218-2 2011). Toisena vaatimuksena on, että robottijärjestelmä suorittaa luokan 0 pysähdysten, mikäli ihminen siirtyy yhteistoimintatilaan ennen turvaluokiteltua valvottua pysähdystä (SFS-EN ISO 10218-2 2011; SFS-EN ISO 10218-1 2011; ISO/TS 15066 2016). Kolmantena vaatimuksena on, että robotin liikutteluun käytettävä ohjauslaite täyttää standardin ISO 10218-1 vaatimukset (SFS-EN ISO 10218-2 2011). Neljäntenä vaatimuksena on operaattorin esteetön näkyvyys koko yhteistoimintatilaan, ja viimeisenä vaatimuksena robotin tulee suorittaa turvaluokiteltu valvottu pysähdys ihmisen lopettaessa käsinojauksen (SFS-EN ISO 10218-2 2011). Käsinojaaminen esitetään kuvassa 4.



*Kuva 4. Käsinojaaminen (Schunk)*

### 2.4.3 Nopeuden ja vähimmäisetäisyyden valvonta

Tässä yhteistoimintatavassa robotti ja ihminen voivat liikkua yhteistoimintatilassa samanaikaisesti, mutta robotin tulee liikkeessaan säilyttää kaikissa tilanteissa riskiarviossa määritetty vähimmäisetäisyys ihmiseen. Etäisyyden ollessa alle määritetyn vähimmäisetäisyyden robotin tulee suorittaa turvaluokiteltu valvottu pysäytys. Etäisyyden palautuessa sallitulle tasolle robotti voi jatkaa toimintaansa automaattisesti. (ISO/TS 15066 2016)

Kuvassa 5 esitetään nopeuden ja vähimmäisetäisyyden valvontaan perustuvan yhteistoimintatavan periaatekuva.



**Kuva 5.** Nopeuden ja vähimmäisetäisyyden valvonta (Schunk)

Vähimmäisetäisyyden laskemisen pohjana hyödynnetään standardissa SFS-EN ISO 13855 esitettyä kaavaa

$$S = (K \times T) + C, \quad (1)$$

jossa  $S$  on vähimmäisetäisyys millimetreinä,  $K$  on kehon tai kehonosien liikenoisuus,  $T$  on järjestelmän kokonaispysähtymisaika ja  $C$  on lähestymisetäisyys millimetreinä. Kaavaa 1 hyödyntämällä teknisessä spesifikaatiossa ISO/TS 15066 on vähimmäisetäisyyden laskemiseen yhteistoimintasovelluksessa luotu kaava

$$S_p(t_0) = S_h + S_r + S_s + C + Z_d + Z_r, \quad (2)$$

jossa  $S_p(t_0)$  on suojaetäisyys ajanhetkellä  $t_0$ ,  $S_h$  on operaattorin liikkeen vaikutus suojaetäisyyteen,  $S_r$  on robottijärjestelmän reaktiomatka,  $S_s$  on robotin pysäytysmatka,  $C$  on etäisyys, jonka operaattori voi kulkea turvalaitteen ohi ennen turvatoimen aktivoitumista,  $Z_d$  on operaattorin sijainnin havaitsemiseen käytettävän laitteiston mittaepävarmuus ja  $Z_r$  on robotin sijainnin mittaepävarmuus. Suojaetäisyyden arvo  $S_p(t_0)$  voidaan laskea robotin eri liikenoisuuksille tai vastaavasti kiinteäksi arvoksi, jolloin käytetään pahimman mahdollisen tilanteen mukaisia arvoja. (ISO/TS 15066 2016)

Lähestymisetäisyys  $C$  saadaan laskettua kaavalla

$$C = 8 \times (d - 14), \quad (3)$$

jossa  $d$  on käytettävän havainnointilaitteen havaitsemiskyky millimetreinä. (SFS-EN ISO 13855 2010; SFS-EN ISO 10218-2 2011)

Mikäli operaattorin liikettä ei tarkkailla, voidaan nopeudeksi olettaa 1,6 m/s. Tällöin operaattorin liikkeen vaikutus suojaetäisyyteen voidaan arvioida kaavalla

$$S_h = 1,6 \times (T_r + T_s), \quad (4)$$

jossa  $T_r$  on robottijärjestelmän reaktioaika sisältäen operaattorin havaitsemisajan signaalin prosessointiaikoihin ja  $T_s$  on robotin pysähtymisaika. (ISO/TS 15066 2016)

Robottijärjestelmän reaktiomatkaa voidaan estimoida kaavalla

$$S_r = v_r(t_0) \times T_r, \quad (5)$$

jossa  $v_r(t_0)$  on robotin nopeus ajanhetkellä  $t_0$ . Mikäli robotin nopeutta ei valvota, on oletettava, että  $v_r$  on robotin maksiminopeus. Mikäli robotin nopeutta tarkkaillaan, voidaan laskelmassa käyttää robottiohjelmassa käytettävää maksiminopeutta. (ISO/TS 15066 2016)

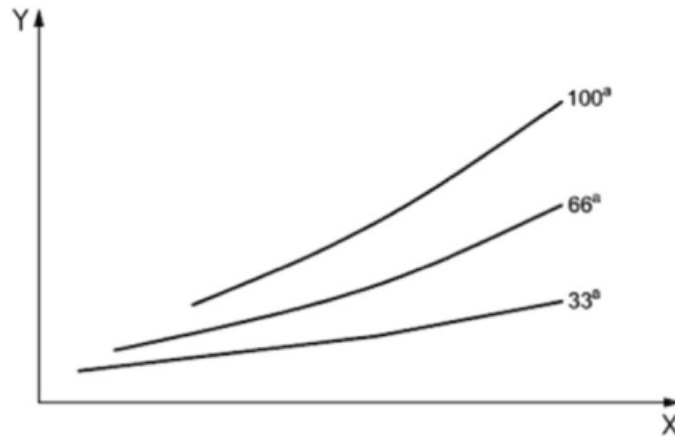
Robottijärjestelmän pysähtymismatka saadaan laskettua kaavalla

$$S_s = \int_{t_0+T_r}^{t_0+T_r+T_s} v_s(t) dt, \quad (6)$$

jossa  $v_s$  on ajan funktiona muuttuva liikenopeus. (ISO/TS 15066 2016)

Robotin käyttöohjekirjassa pysähtymisajat annetaan yleensä pahimman mahdollisen tilanteen mukaan. Tämä tarkoittaa maksimaalista kuormaa ja suurinta nopeutta, mikä johtaa pitkiin pysähtymisaikoihin. Robotin nopeutta on kuitenkin mahdollista rajoittaa ohjelmallisesti. Mikäli nopeudenvälvontajärjestelmä täyttää standardissa SFS-EN ISO 13849-1:2006 määritetyt vaatimukset turvallisuusjärjestelmän suorituskyvystä, voidaan turvaetäisyydet määrittää ohjelmoidun nopeuden mukaan (SFS-EN ISO 10218-2 2011). Mikäli robotin valmistaja on suorittanut mittauksia useilla eri nopeuksilla ja kuormilla, voi valmistaja esittää kuorman ja nopeuden vaikutusta pysähtymisaikaan kuvan 6 osoittamalla tavalla.

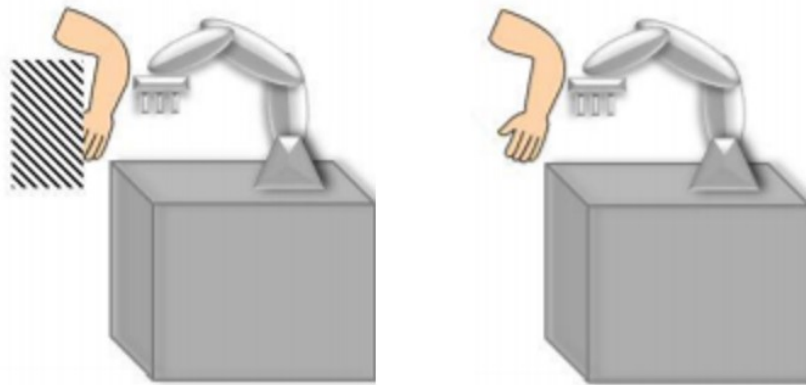




**Kuva 6.** Kuorman vaikutus pysähtymismatkaan. Nopeus esitetään *x*-akselilla ja pysähtymisaika *y*-akselilla. (SFS-EN ISO 10218-1 2011)

#### 2.4.4 Tehon ja voiman rajoittaminen

Tässä yhteistoimintatavassa fyysinen kontakti ihmisen ja robotin välillä voi tapahtua joko tarkoituksella osana työprosessia tai vahingossa ihmisen virheen tai järjestelmän vikaantumisen johdosta (ISO/TS 15066 2016). Fyysiset kontaktit jaotellaan kahden tyyppisiin törmäyksiin. Ensimmäiseen törmäysluokkaan kuuluvat törmäykset, joissa jokin ihmisen ruumiinosa jää robotin ja esteen väliin puristuksiin. Ihmisen tulee kuitenkin pystyä omatoimisesti vapauttamaan itsensä puristuksesta (ISO/TS 15066 2016). Puristavan törmäyksen suurimmaksi voima-arvoksi katsotaan arvo, joka ilmenee 500 ms törmäyksen ensi kontaktista (ISO/TS 15066 2016). Toiseen törmäysluokkaan kuuluvat törmäykset, joissa robotti törmää ihmiseen, mutta mikään ihmisen ruumiinosa ei jää puristuksiin (ISO/TS 15066 2016). Kyseessä on siis hetkellinen kontakti, mistä johtuen törmäyksessä aiheutuvat voima- ja painetasot saavat olla suurempia kuin puristavassa törmäyksessä (ISO/TS 15066 2016). Edellä mainitut törmäystilanteet on havainnollistettu kuvassa 7.



**Kuva 7.** Vasemmalla havainnekuva puristusta aiheuttavasta törmäystilanteesta ja oikealle puristusta aiheuttamattomasta törmäystilanteesta. (Collaborative robot systems, 2017)

Molemmista edellä mainituista törmäystilanteista tulee tehdä ihmiselle turvallisia tunnistamalla mahdolliset kontaktitilanteet ja niiden todennäköisyydet, suunnittelemalla yhteistoiminta-alue siten, että kontaktitilanteet ovat harvinaisia ja vältettävissä, sekä pitämällä voima-, paine- ja liikemäärätasot alle riskiarviossa määritettyjen kynnsarvojen (ISO/TS 15066 2016). Teknisessä spesifikaatiossa ISO/TS 15066 annetaan voima- ja paineraja-arvot ihmisen eri ruumiinosille, joten näitä arvoja voidaan käyttää apuna riskiarvion kynnsarvoja määrittäessä. Teknisessä spesifikaatiossa annettavat painearvot perustuvat Mainzin yliopistossa tehtyyn tutkimukseen ja voima-arvot puolestaan Deutsche Gesetzliche Unfallversicherungin tutkimukseen (Design of workplaces with collaborative robots, 2011; Muttray et al. 2014; ISO/TS 15066 2016). On tärkeää huomata, että tehon ja voiman rajoitukseen perustuvassa yhteistoiminnassa päähän kohdistuvat iskut eivät ole sallittuja missään tilanteessa (ISO/TS 15066 2016).

Tehon ja voiman rajoituksen käyttäminen yhteistoimintasolun yhteistoimintatapana on mahdollista vain siinä tapauksessa, että käytettävä robotti täyttää standardissa SFS-EN ISO 10218-1 tehon ja voiman rajoitukseen perustuvalle yhteistoimintasovelluksille asetetut vaatimukset (SFS-EN ISO 10218-2 2011; ISO/TS 15066 2016). Teknisen spesifikaation ISO/TS 15066 mukaan suunnittelijan tulee osoittaa, että yhteistoimintasovelluksessa mahdollisesti tapahtuvat törmäykset eivät aiheuta vaarallisen suuria voimia tai paineita (ISO/TS 15066 2016). Mikäli yhteistoimintasovelluksessa esiintyy riski vapaalle törmäykselle, tulee integroijan ottaa huomioon myös törmäyksen ihmisen vartaloon siirtämä energia (ISO/TS 15066 2016). Tekninen spesifikaatio ISO/TS 15066 olettaa törmäystilanteen täysin kimmottomaksi, ja ihmisen ruumiinosia simuloivat annetut jousivakiot pätevät pinta-alaltaan noin yhden neliösenttimetrin törmäyspinoille (ISO/TS 15066 2016). Kuvassa 8 esitetään periaatekuva tehon ja voiman rajoittamisesta yhteistoimintatapana.



**Kuva 8.** Tehon ja voiman rajoittaminen (Schunk)

Robotin törmäystilanteessa törmäyskohteeseen siirtämä mekaaninen teho lasketaan kaavalla

$$P = \frac{F \times dx}{dt}, \quad (7)$$

jossa  $F$  on törmäystilanteessa syntyvä voima,  $dx$  robotin törmäyksen aikana kulkema matka ja  $dt$  törmäykseen kuluva aika.

Ihmisen vartalon eri alueille suurin sallittu energiasiirto saadaan ISO/TS 15066 (2016) mukaan laskettua kaavalla

$$E = \frac{F_{max}^2}{2k} = \frac{A^2 p_m^2}{2k}, \quad (8)$$

jossa  $E$  on törmäyksen vaikutuksesta siirtyvä energia,  $F_{max}$  on suurin sallittu törmäysvoima ja  $k$  on vartaloalueen efektiivinen jousivakio. Suurimman sallitun siirtyvän energian määrittämisen jälkeen siirrytään määrittämään robotin suurimpaa sallittua liikkumisnopeutta yhteistoimintatilassa. Teknisessä spesifikaatiossa ISO/TS 15066 annetaan kaava robotin ja ihmisen redusoidun massan laskemiseen. Tämä kaava annetaan muodossa

$$\mu = \left( \frac{1}{m_H} + \frac{1}{m_R} \right)^{-1}, \quad (9)$$

jossa  $m_H$  on ihmisen vartaloalueen massa ja  $m_R$  robotin efektiivinen massa, joka saadaan laskettua kaavalla

$$m_R = \frac{M}{2} + m_L, \quad (10)$$

jossa  $m_L$  on robotin efektiivinen kuorma ja  $M$  kaikkien robotin liikkuvien osien kokonaismassa.

Jatkamalla kaavaa 8 saadaan yhtälö

$$E = \frac{F_{max}^2}{2k} = \frac{1}{2}\mu v_{rel}^2, \quad (11)$$

jossa  $v_{rel}$  on robotin ja ihmisen vartalon välinen suhteellinen nopeus. Muokkaamalla tätä yhtälöä edelleen saadaan johdettua kaava robotin liikkumisnopeudelle. Tämä kaava muuntuu täten muotoon

$$v_{rel,max} = \frac{F_{max}}{\sqrt{\mu k}} = \frac{p_{max}A}{\sqrt{\mu k}} \quad (12)$$

## 2.5 Yhteistoimintasovelluksen suunnittelu

Tässä alaluvussa käsitellään ihminen-robotti yhteistoimintasovelluksen suunnitteluun liittyvää teoriaa. Erityisesti käsitellään yhteistoimintasovelluksen turvallisuutta, sillä Kirchner et al. (2015) mukaan robotin ja ihmisen välisen interaktion kasvaessa robotin ja robottisolun suunnittelussa on kiinnitettävä turvallisuuteen uudenlaista huomiota.

### 2.5.1 Yhteistoimintasovelluksen turvallisuuden perusteet

Robottisolun turvallisuus voi perustua useaan erilaiseen menetelmään. Lasota et al. (2017) mainitsee neljä erilaista menetelmää ihminen-robotti yhteistoimintasovelluksen turvallisuuden varmistamiseen. Ensimmäinen menetelmä on varmistaa turvallisuus yhteistoiminnan ja robotin kontrolloinnin avulla. Toinen menetelmä on suunnitella robotin liikeradat siten, että törmäyksiä ei tapahdu. Tämä menetelmä on ennakoiva eli se pyrkii välttämään törmäyksiä. Kolmas menetelmä on saavuttaa turvallisuus ihmisen liikkeitä ennustamalla. Neljäs menetelmä on varmistaa, että yhteistoimintasolu on käyttäjäystävällinen eikä aiheuta stressiä operaattorille. Ensimmäinen menetelmä, eli robotin kontrollointi voidaan jakaa kahteen luokkaan, jotka ovat ennen törmäystä tehdyt toimenpiteet ja törmäyksen jälkeen tehdyt toimenpiteet. Törmäystä ennen tehtävät toimenpiteet vaativat joko ihmisen, robotin tai molempien sijainnin valvontaa. Valvontatietojen perusteella robotin ohjausparametreja säädetään siten, että törmäyksestä saadaan turvallinen tai törmäys voidaan välttää kokonaan. Mikäli yllättävä törmäys tapahtuu, törmäyksen jälkeisillä toimenpiteillä varmistetaan, että robotti havaitsee törmäyksen ja estää vaaran aiheutumisen ihmiselle. (Lasota et al. 2017)

Lasota et al. (2017) jakaa ennen törmäystä tapahtuvat toimenpiteet kolmeen luokkaan. Ennen törmäystä tapahtuvien toimenpiteiden ensimmäisessä luokassa tavoitteena on varmistaa, että robotti ei ole ihmiselle vaaraksi missään tilanteessa. Tämä toteutetaan asettamalla robotin ohjausjärjestelmälle rajoituksia esimerkiksi nopeuden, energian ja voiman suhteen. Robotin liikkeiden eri parametrien rajoittamiseen löytyy kirjallisuudesta useita erilaisia menetelmiä. Broquere et al. (2008) kehittämällä

liikeradansuunnittelutyökalulla voidaan rajoittaa kvaternion avulla robotin kiihtyvyyttä, nopeutta ja nykäystä karteesisessa koordinaatistossa. Laffranchi et al. (2009) esittämällä menetelmällä voidaan rajoittaa robottijärjestelmään varastoitunutta energiaa ihmisen sijainnin perusteella. Heinzmann & Zelinsky (2003) esittämällä moottoreiden väännörajoitusmenetelmällä pystytään rajoittamaan törmäysvoimia. Tässä menetelmässä robotin moottoreiden vääntöä rajoitetaan sijaintitiedon perusteella siten, että turva-asetuksissa asetetut voimarajat eivät ylity (Heinzmann & Zelinsky 2003). Haddadin et al. (2012) esittämä malli mahdollistaa liikkuvan massan, nopeuden ja törmäystilanteen geometrian sekä aiheutuneen vamman välisen yhteyden huomioimisen robotin liikkeen suunnittelussa.

Ennen törmäystä tapahtuvien toimenpiteiden toisessa luokassa robotin liikettä hidastetaan tai tarvittaessa robotti pysäytetään törmäyksen välttämiseksi kokonaan (Lasota et al. 2017). Yksi esimerkki nopeuden ja vähimmäisetäisyyden valvontaan käytettävistä työkaluista on ABB:n kehittämä SafeMove, joka säätelee robotin nopeutta erikseen määritellyille vyöhykkeille sopivaksi (Lasota et al. 2017). Toinen esimerkki nopeuden ja vähimmäisetäisyyden valvonnasta on Vogel et al. (2013) esittämä järjestelmä, joka perustuu robotin nivelten asematietojen ja nopeuden perusteella muuttuviin turva-alueisiin, jotka heijastetaan ihmisten nähtäville projektorilla. Ennen törmäystä tapahtuvien toimenpiteiden kolmannessa luokassa törmäyksiä pyritään estämään hyödyntämällä potentiaalikenttiä ja riskiluokituksia (Lasota et al. 2017).

Lasota et al. (2017) jakaa törmäyksen jälkeen tapahtuvat toimenpiteet kahteen luokkaan, joista ensimmäisen luokan toimenpiteiden tavoitteena on tunnistaa törmäys ja pysäyttää robotti, kun taas toiseen luokkaan kuuluvien toimenpiteiden tavoitteena on tunnistaa, onko törmäys ihmisen haluama vai vahingossa tapahtunut ja säätelee robotin toimintaa sen mukaan. Lasota et al. (2007) mukaan ensimmäisen luokan toimenpiteiden kohdalla robotin tulee olla kykeneväinen tunnistamaan törmäystilanne. De Luca et al. (2006) tekemän tutkimuksen mukaan törmäyksen tunnistus voidaan toteuttaa yhdistelemällä nivelten asematietoa, nivelten nopeuksia ja niveliin kohdistuvaa vääntöä (Luca et al. 2006). Tämä ratkaisun käyttämiseksi robotin nivelissä pitää kuitenkin olla vääntöanturit (Lasota et al. 2017). Geravand et al. (2013) mukaan törmäyksen tunnistamisen ongelma on vääntöantureilla varustettujen robottien kohdalla ratkaistu, joten tehdyssä tutkimuksessa keskityttiin vääntöantureilla varustamattomien robottien törmäysentunnistusmenetelmiin. Geravand et al. (2013) esittää tutkimuksessaan tavan tunnistaa törmäys käyttämällä ainoastaan robotin nivelten nopeuksien referenssitietoja, nivelten moottoreiden virtatietoja sekä nivelten asematietoja. Toiseen luokkaan kuuluvien törmäysten jälkeisten toimenpiteiden kohdalla tavoitellaan interaktiivisia kontaktitilanteita (Lasota et al. 2017). Edellä kerrottiin, kuinka ensimmäiseen luokkaan kuuluvien toimenpiteiden tavoitteena on pysäyttää robotti ja minimoida törmäyksen aiheuttamat seuraukset. Lasota et al. (2017) mukaan robotin tulee tässä luokassa tunnistaa ihmisen halukkuus interaktioon ja yrittää toimia yhteistyössä ihmisen kanssa. Lasota et

al. (2017) mukaan turvallisen interaktion takaamiseksi on tärkeää määrittää, mihin ruumiinosiin robotti voi koskea ja millaisella voimalla interaktio voi tapahtua.

Teknisen spesifikaation ISO/TS 15066 mukaan yhteistoimintasovelluksen riskejä voidaan pienentää joko passiivisesti tai aktiivisesti. Passiivisella riskien pienennyksellä tarkoitetaan yhteistoimintasovelluksen turvallisuuden suunnittelua rakenteellisin keinoin, kun taas aktiivinen riskien pienentäminen tarkoittaa ohjausjärjestelmän osuutta riskienhallinnassa. Esimerkkeinä passiivisesta riskien pienennyksestä voidaan pitää törmäyspinta-alan kasvattamista, liikkuvien massojen pienennystä sekä pehmeiden törmäysvoimia absorboivien materiaalien käyttämistä. Esimerkkeinä aktiivisista riskien pienennysmetodeista voidaan käyttää voiman, liikemäärän ja nopeuden rajoitusta sekä erilaisten turvalaitteiden käyttämistä. (ISO/TS 15066 2016)

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherungin mukaan robotin liikkeitä ja robottisolua suunniteltaessa on huolehdittava passiivisten ja aktiivisten riskien minimointikeinojen avulla, että ihmisen varomattomat liikkeet eivät johda tapaturmaan. DGUV:n ohjeistuksessa annetaan esimerkkejä ennakoitavissa olevista ihmisen toimista, jotka tulee huomioida yhteistoimintasovelluksen suunnittelussa:

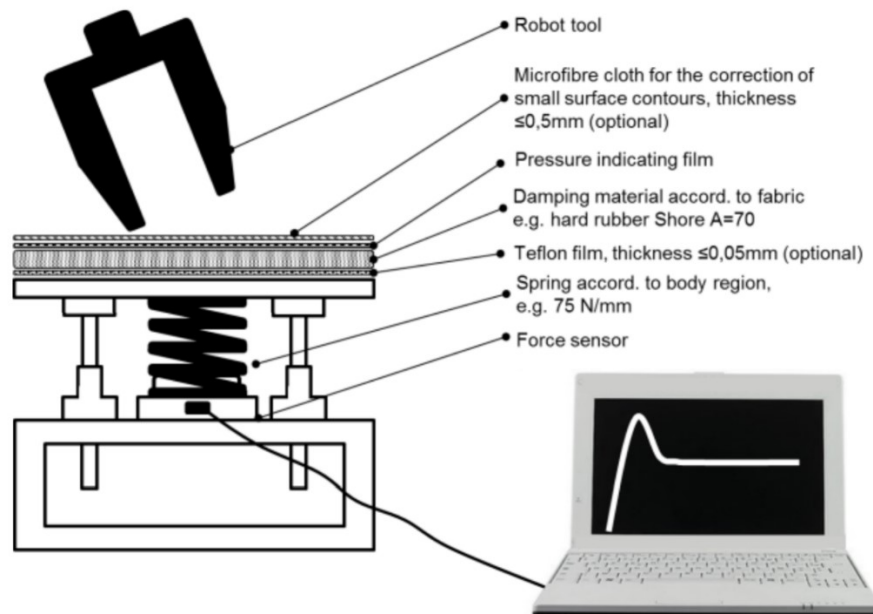
1. Ihmisen puuttuminen robotin toimintaan esimerkiksi refleksinomaisesti tilanteessa, jossa ihminen huomaa virheellistä toimintaa. (Collaborative robot systems, 2017)
2. Työprosessin havainnointi, jonka yhteydessä ihminen voi esimerkiksi nojautua robotin työalueelle. (Collaborative robot systems, 2017)
3. Mikäli robotti tai ihminen pudottaa tavaran lattialle, on huomioitava, että osan nostaminen ei altista ihmistä vaaralle. (Collaborative robot systems, 2017)

Mikäli valittu yhteistoimintasovelluksen yhteistoimintatapa on tehon ja voiman rajoittaminen, tulee mahdollisen törmäystilanteen seuraukset ottaa huomioon. Tämä saattaa Harpur (2012) mukaan olla haastavaa, sillä kaikki potentiaaliset törmäystilanteet tulee tunnistaa riskinarvioinnin yhteydessä. Ihmisen ja robotin välisen törmäyksen vakavuuden arviointia monimutkaistaa Harpur (2012) mukaan ihmiskehon käyttäytyminen törmäystilanteissa, sillä yläselkään kohdistunut isku ei välttämättä aiheuta vammaa iskukohtaan, vaan voi johtaa piiskaniskuvaikutuksen johdosta esimerkiksi niska- ja kaula-alueen vammoihin. Törmäyksestä syntyviä voimia on mahdollista pienentää esimerkiksi kevytrakenteisia robotteja käyttämällä, jolloin liikkuvat massat ovat pienempiä (Hirzinger et al. 2002; Luca et al. 2006). Robotti voidaan myös päällystää pehmeällä törmäystä vaimentavalla materiaalilla, jolloin mahdollisen törmäyksen vaikutukset pienenevät (Yamada et al. 1996).

## 2.5.2 Törmäysvoiman mittaaminen

Yhteistoimintasovelluksen perustuessa tehon ja voiman rajoittamiseen on suositeltavaa mitata törmäyksen aiheuttaman voiman ja paineen suuruudet. Mikäli robotin liikkuminen voi aiheuttaa puristavan törmäyksen ihmisen ruumiinosalle, tulee robotin nopeus mitoittaa siten, että robotin turvajärjestelmä pystyy pitämään robotin tuottaman voiman alle teknisessä spesifikaatiossa ISO/TS 15066 eri ruumiinosille määritettyjen kynnyksarvojen. (ISO/TS 15066 2016)

Teknisessä spesifikaatiossa ISO/TS 15066 annetaan ohjeellisia jousivakioita ihmisen eri ruumiinosien simulointiin. Käytännön kokeet ovat kuitenkin osoittaneet, että voimanmittaustulokset eroavat eri jousien välillä vähäisesti (Collaborative robot systems, 2017). Päähän kohdistuvat iskut eivät teknisen spesifikaation ISO/TS 15066 mukaan ole sallittuja, joten vartalon simulointiin annetut jousivakiot vaihtelevat välillä 10 N/mm – 75 N/mm (ISO/TS 15066 2016). Suunnitteluvaiheessa on hyvä varautua mahdollisiin väärinkäyttötilanteisiin käyttämällä mittauksissa jousivakion 75 N/mm omaavaa joustaa (Collaborative robot systems, 2017).



**Kuva 9.** Esimerkki voiman ja paineen mittaukseen käytettävästä mittauslaitteistosta (Collaborative robot systems, 2017).

Kuvassa 9 esitetään DGUV:n suositusten mukainen mittauslaitteisto törmäyksen aiheuttaman voiman ja paineen mittaukseen. Mittauslaitteisto koostuu seuraavista osista:

1. Voima-anturi
2. Jousi (esimerkiksi 75 N/mm)
3. Teflon-kalvo

4. Kumilevy (Shore A 70, 7 mm)
5. Paineherkkä kalvo (esimerkiksi Fujifilm Prescale)
6. Mikrokituliina

Mittauslaitteen rakenne muodostuu pohjaosasta, törmäystasosta ja lineaarijohteista, jotka toimivat mittauslaitteen liukukomponentteina. Kuvassa näkyvän teflon-kalvon ja mikrokituliinan käyttäminen ei DGUV:n ohjeistuksen mukaan ole välttämätöntä. DGUV:n mukaan erittäin nopeissakin törmäystilanteissa mittaussignaalit sisältävät normaalisti alle 100 Hz taajuuksia. Tästä johtuen mittausdata tulee suodattaa Butterworthin alipäästösuotimella 100 Hz rajoitustaajuudella DGUV:n ohjeistuksen mukaisesti. (Collaborative robot systems, 2017)

### 2.5.3 Suojaetäisyyksien määrittäminen

Optisten turvalaitteiden, kuten esimerkiksi valoverhojen ja turvalaserscannerien suurin ongelma on suuri suojaetäisyysvaatimus suoja-aitoihin verrattuna. Salmi et al. (2014) laskivat tutkimuksessaan 45 kg:n kantavuuden ja 2051 mm ulottuvuuden omaavalle robotille suojaetäisyysvaatimukseksi 1776 mm, mikä aiheuttaa huomattavan suuren tilantarpeen. Nykyisin monet robottivalmistajat tarjoavat robotteihinsa turvaohjainta, joka mahdollistaa robotin sijainnin ja nopeuden tarkkailun. Yhdistettäessä turvakontrollerin ja esimerkiksi turvalaserscannerin tietoja avautuu uudenlaisia mahdollisuuksia turvaetäisyyden pienentämiseen. Turvaohjaimen asetuksissa on mahdollista määrittää erilaisia robotin operointivähykkeitä ja asettaa maksimiarvoja robotin TCP-nopeudelle. Turvaohjain tarkkailee näitä asetettuja vähykerajoja sekä nopeuden arvoa ja pysäyttää robotin, mikäli poikkeama asetettuihin rajoihin verrattuna huomataan. Turvaohjaimen toimintaan liittyy kuitenkin haasteita, sillä se ei pysäytä robottia ennen määritetyn vähykerajan ylittymistä, vaan vasta vähykerajan ylityksen jälkeen. Tästä ominaisuudesta johtuen raskasrakenteinen robotti voi ohjelmointivirheen johdosta liikkua huomattavasti määritettyjä vähykerajoja pidemmälle. (Salmi et al. 2014)

Robotin työalueen ja maksiminopeuden rajaaminen ovat parhaita keinoja vaadittujen suojaetäisyyksien vähentämiseen. Tarkasteltaessa liikkeeseen liittyviä fysiikan kaavoja huomataan, että robotin nopeuden vähentäminen on tehokas keino robotin jarrutusmatkan vähentämiseen. Robotin valmistajat antavat ainoastaan pahimman mahdollisen tilanteen pysähtymisajat maksimaaliselle nopeudelle ja kuormalle, joka perustuu robotin ensimmäisen akselin pysähtymisaikaan. Robotin maksimaalinen pysähtymisaika on siis aika, joka robotilta kestää pysähtyä ensimmäisen akselin liikkuessa maksiminopeudellaan siten, että robotin käsivarsi on täysin ojentunut. Tällaisessa tilanteessa muiden akselien liikkuminen lisää TCP-nopeutta, mutta ei vaikuta kokonaispysähtymisaikaan. Salmi et al. (2014) tutkivat robotin nopeuden vaikutusta robotin pysähtymisaikaan ja siten vaadittavaan suojaetäisyyteen. Tutkimuksen karkeina johtopäätöksinä todettiin, että robotin nopeuden pudottaminen 50 prosentilla pysähtymisaika putoaa myös noin 50



prosenttia, mikä pienentää suojaetäisyysvaatimusta noin 60 prosentilla. (Salmi et al. 2014)

Salmi et al. (2014) toteaa tutkimuksessaan, että robotin nopeus joudutaan pitämään alhaisena, jotta suojaetäisyydet pysyisivät teollisuuden yhteistoimintasovelluksien kannalta järkevinä. Tutkimuksessa myös todetaan, että robotin työalue kannattaa jakaa nopeusvyöhykkeisiin, jolloin hitaampia nopeuksia käytetään yhteistoiminta-alueen läheisyydessä. Lisäksi todetaan, että robotin nivelten kiihtyvyydellä on tahtiikaan suurempi vaikutus kuin robotin huippunopeudella.

#### **2.5.4 Työntekijöiden huomioiminen suunnittelussa**

Elprama et al. (2017) mukaan ihminen-robotti yhteistoimintasovellusten yleistymisestä huolimatta robottien loppukäyttäjiin, eli tehtaan työntekijöihin, on kiinnitetty vähän huomiota. Elprama et al. (2017) tekemässä tutkimuksessa haastateltiin autotehtaan korilinjalla työskenteleviä ihmisiä. Kaikki tutkimuksessa haastatellut henkilöt olivat huolissaan robottien mahdollisesti viemistä työpaikoista. Haastatellut henkilöt kertoivat robottien keventäneen heidän työskentelyään, mutta toisaalta vähentäneen kontakteja muihin työntekijöihin. Tehtaaseen tulleiden teollisuusrobottien koettiin vaikuttaneen työntekijöiden työskentelytapoihin negatiivisesti, sillä oma työtahti pitää sovittaa robotin tahdin mukaiseksi. Tutkimuksessa haastatellut henkilöt laitettiin myös työskentelemään tehon ja voiman rajoitukseen perustuvassa yhteistoimintasolussa. Useimmat yhteistoimintasolussa työskennelleistä totesivat, että olisivat tehneet kokoonpanon nopeammin ilman robotin apua.

Jocelyn et al. (2017) mukaan yhteistoimintasovelluksen rakennuksen aikainen työntekijöiden tiedottaminen on tärkeää, jotta erilaiset näkemykset voidaan ottaa suunnittelussa huomioon. Mikäli työntekijöiden toiveet ja vaatimukset huomioidaan suunnitteluvaiheessa, yhteistoimintasovellus saadaan räätälöityä työntekijöiden toiveiden mukaiseksi eikä työntekijöiden tarvitse omaksua uusia, mahdollisesti hankalaksi koettuja toimintatapoja. Tämä myös pienentää mahdollista muutosvastarintaa. Jocelyn et al. (2017) mukaan työntekijöille on tärkeää myös tarjota käyttöohjeet, joista oikeiden toimintatapojen tarkistaminen tarvittaessa onnistuu.

### 3. KOKEELLINEN OSUUS

Tässä luvussa esitellään työssä käytetyt tutkimusmenetelmät. Eri tutkimusmenetelmillä tutkitaan yhteistoimintatapoja ja niiden toimintaa, jotta voidaan tehdä päätös Vaisalalle parhaiten soveltuvasta yhteistoimintatavasta. Tehon ja voiman rajoituksen soveltuvuutta Vaisalan tarpeisiin tutkitaan kokeellisena tutkimuksena. Nopeuden ja vähimmäisetäisyyden valvontaa tutkitaan mallintamalla. Robotille pyritään mallintamaan mahdollisimman todenmukainen pysähtymisaika, jonka perusteella suojaetäisyys voidaan määrittää.

#### 3.1 Kokeellinen tutkimus

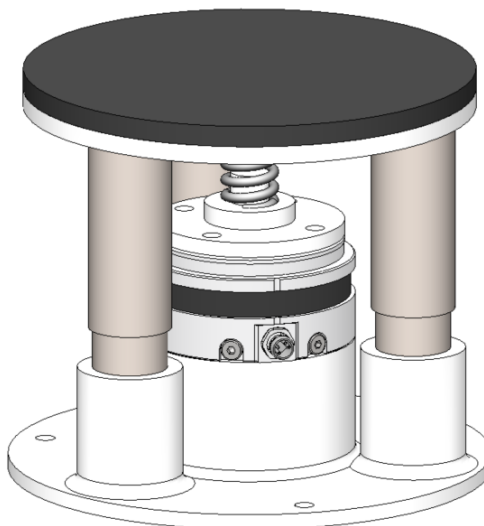
Tässä alaluvussa käsitellään tämän diplomityön aikana toteutettua kokeellista tutkimusta. Kokeellisessa tutkimuksessa on tarkoitus mitata yhden muuttujan vaikutusta toiseen muuttujaan (Hirsjärvi et al. 2009). Tässä kokeellisessa tutkimuksessa tutkitaan robotin liikenopeuden muutoksen vaikutusta törmäysvoiman suuruuteen. Teknisen spesifikaation ISO/TS 15066 mukaan robotin liikenopeus tulee asettaa siten, että puristavassakaan törmäyksessä törmäyksen kohteena olevalle ruumiinosalle annetut voima- ja painerajat eivät ylitä. Tekninen spesifikaatio suosittelee varmistamaan todellisen törmäystilanteen voiman ja paineen mittaamalla. Kokeellisen tutkimuksen tavoitteena on tutkia, kuinka suurella nopeudella Universal Robots 10-robotin on sallittua törmätä ihmisen käteen, kun törmäys aiheuttaa puristusta.

Teknisessä spesifikaatiossa ISO/TS 15066 annetaan puristusta aiheuttavan törmäyksen suurimmat sallitut voima- ja painearvot. Teknisen spesifikaation mukaan käteen kohdistuva puristavan törmäyksen aiheuttama voima saa olla suuruudeltaan maksimissaan 140 N, kun taas käsivarteeseen voidaan kohdistaa maksimissaan 160 N suuruinen voima. Vaisalan yhteistoimintasovelluksen suurimmaksi sallituksi voimatasoksi valittiin 140 N, jotta suunnittelu tulee tehtyä ennakolta riskialtteimman tilanteen mukaisesti. Suurinta sallittua painetta rajoittava ruumiinosa on käsivarren lihas. Tähän lihakseen kohdistettava paine saa puristusta aiheuttavassa törmäyksessä olla enintään 180 N/cm<sup>2</sup>. On täysin törmäystilanteesta riippuvaa, onko törmäyksen nopeutta rajoittava tekijä voima vai paine. Esimerkiksi suuripinta-alaisen työkalun törmätessä ihmisen pehmeään kudokseen voimaraja on todennäköisesti rajoittava tekijä. Vastaavasti esimerkiksi käden jäädessä puristuksiin robotin työkalun väliin paine on todennäköisesti rajoittava tekijä. (ISO/TS 15066 2016)

#### Törmäysmittalaitteen rakennus

Törmäyksen aiheuttaman voiman ja paineen mittaamiseen on mahdollista käyttää mittauspalvelua, jossa robotilla törmätään voima-anturoituun mittalaitteeseen. Tämän

projektin tarpeisiin mittauspalveluiden hinta osoittautui liian kalliiksi, joten mittalaite päätettiin rakentaa itse. Mittalaite pohjautuu Optoforcen HEX-E voima-anturiin, jonka kohinavapaa resoluutio on x- ja y-suunnissa 0,2 N ja z-suunnassa 0,8 N (Optoforce HEX-E datasheet, 2018). Mittalaitteeseen voidaan asentaa eri jousivakion omaavia jousia, jolloin eri ruumiinosiin kohdistuvien törmäyksien testaaminen on mahdollista. Törmäysmittalaite esitetään kuvassa 10.



**Kuva 10.** Puristusta aiheuttavan törmäyksen mittaukseen rakennettu mittalaite.

Mittalaitteen rakenne koostuu seitsemästä erilaisesta osasta:

1. 3D-tulostettu pohjaosa (ABS-muovi)
2. 3D-tulostettu yläosa (ABS-muovi)
3. 3D-tulostettu voima-anturin päällä oleva jousenpidike (ABS-muovi)
4. Kuminen törmäyspinta (Shore A 70 kumi, paksuus 6 mm)
5. Jousi (75 N/mm ja 118 N/mm, Ruostumaton teräs)
6. 3 kpl mäntiä (Ruostumaton teräs)
7. 3 kpl sylintereitä (Ruostumaton teräs)

DGUV:n ohjeistuksen mukaisen kumisen törmäyspinnan löytäminen asetti suuria hankaluuksia. DGUV suosittaa 7 mm paksuisen kovuudeltaan shore A 70 kumimaton käyttämistä, mutta tällaista mattoa ei ollut saatavissa. Lopulta päädyttiin käyttämään 6 mm:n paksuista mattoa, jonka saatavuus oli huomattavasti parempi.

Törmäysmittalaitteeseen on mahdollista asentaa eri jousivakion omaavia jousia, mutta pääasiassa mittaukset tehtäisiin jousella, jonka jousivakio on 75 N/mm. Tällöin mittaukset suoritetaan ennakolta riskialtteen tilanteen mukaisesti, kun päähän kohdistuvat iskut jätetään huomioimatta (ISO/TS 15066 2016). Lisäksi mittalaitteessa käytetään myös joustaa, jonka jousivakio on 118 N/mm. Tämän jousen käyttämisellä pyritään hahmottamaan jousivalinnan vaikutusta mittauksien tuloksiin.

### **Koejärjestely**

Voimatasojen monitorointiin käytettiin Optoforcen omaa ohjelmistoa, jolla saadaan voiman vaikutusajan lisäksi tallennettua mittalaitteeseen vaikuttava voima ja momentti. Mittausten näytteenottotaajuudeksi valittiin 500 Hz, sillä se oli suurin valittavissa oleva näytteenottotaajuus. Törmäykset suoritettiin robotin työkalulaipalla, eikä työkalulaipassa ollut kiinni työkalua.

Törmäyksen aiheuttaman paineen mittaukseen pohdittiin kahta erilaista tapaa. Ensimmäinen tapa oli yksinkertainen laskutoimitus  $p=F/A$ , jossa  $F$  on törmäyksen aiheuttama maksimivoima ja  $A$  on törmäyspinta-ala, joka voidaan katsoa suoraan CAD-mallista. Tätä tapaa käyttämällä yhdestä törmäyksestä on mahdollista laskea törmäyspaineita eri robotin osille, jolloin testaus yksinkertaistuu. Toinen tapa törmäyksen aiheuttaman paineen mittaukseen on Fujifilm Prescale-filmi, johon kehittyy törmäyksen voimasta punainen jälki. Mitä tummempi väri filmiin kehittyy, sen suurempi on ollut törmäyksen aiheuttama paine. Filmille kehittynyttä väriä voidaan verrata tuotteen mukana toimitettavaan värikarttaan, jolloin saadaan karkeasti selville törmäystilanteessa esiintynyt suurin paine. Filmille kehittyneen värin silmämääräinen vertailu värikarttaan on hyvin karkeata ja sen avulla on mahdollista päästä noin 10 % tarkkuuteen. Mikäli filmin värin analysointi halutaan tehdä tarkemmin, voidaan käyttää tähän tarkoitukseen myytävää scanneria.

Törmäyksen muodostamaa painetta päätettiin estimoida laskemalla, sillä paineherkän filmin värinmuutoksen silmämääräisen analysoinnin todettiin olevan liian epätarkkaa eikä erilliseen analysointilaitteeseen haluttu tässä kohtaa investoida. Lisäksi filmiä käytettäessä tutkittavista törmäyspinoista olisi pitänyt valmistuttaa törmäystestejä varten kopiot, sillä esimerkiksi tarttujan vahingoittumisen riskiä ei haluttu ottaa.

Kokeellista tutkimusta varten robotille ohjelmoitiin ohjelma, jossa robotti liikkuu lineaariliikkeellä metrin mittaista matkaa vertikaalisesti. Matkan puoliväliin asetettiin rakennettu mittaustaite. Pitkällä liikematkalla varmistettiin, että robotti ehtii kiihtyä tavoitenopeuteen ennen törmäystä. Toisaalta pitkällä liikematkalla pyrittiin myös varmistamaan, että robotti ei ala jarruttaa tavoitepisteen lähestyessä, mikä johtaisi liian alhaiseen törmäysnopeuteen. Törmäystestejä varten robotin turva-asetuksissa asetettiin voimarajaksi 100 N, suurimmaksi sallituksi mekaaniseksi tehoksi 300 W, suurimmaksi työkalupisteen nopeudeksi 1500 mm/s ja maksimaaliseksi liikemääräksi 25 kg m/s. Robotin ohjelmaan asetettu kiihtyvyys oli 700 mm/s<sup>2</sup>.

### **Suoritettut mittaukset**

Mittaukset aloitettiin robotin työkalupisteen nopeudesta 100 mm/s, jonka jälkeen edettiin 100 mm/s portailla kohti suurempia nopeuksia. Mittausten tavoitteena oli selvittää suurin sallittu nopeus, jolla tapahtuva törmäys ei tuota 140 N voimaa suurempia voimia. Testien aikana kuitenkin huomattiin, että tämä voimaraja ylittyy jo nopeudella 200 mm/s. Tästä

johtuen tätä korkeammilla nopeuksilla suoritettiin mittauksia ainoastaan havainnointimielessä ja varsinaiset toistomittaukset muodostettiin ainoastaan nopeuksilla 100 mm/s ja 200 mm/s. Molemmilla nopeuksilla aiheutuvaa törmäysvoimaa mitattiin kolmesti, mitä pidettiin riittävänä määränä tulosten ollessa hyvin lähellä toisiaan.

Silmämääräisten havaintojen mukaan nopeuksien 100 mm/s, 200 mm/s ja 300 mm/s törmäykset olivat pehmeitä ja robotti selviytyi niistä hyvin. Robotti suoritti törmäyksen yhteydessä luokan 2 pysähdysten, joten robotti saattoi jatkaa ohjelman suorittamista törmäysilmoituksen kuittaamisen jälkeen. Törmäyksen yhteydessä robotti myös peruutti hieman tulosuuntaansa, joten törmäystestilaitte ei jäänyt puristuksiin. Nostettaessa nopeutta arvoihin 400 mm/s, 500 mm/s ja 600 mm/s törmäykset alkoivat vaikuttaa silminnähtävien voimakkaammilta. Robotti ei enää suorittanutkaan luokan 2 pysähdystä, vaan luokan 0 pysähdysten. Tämä aiheutti virran katkeamisen ja jarrujen kytkeytymisen, jolloin törmäysmittalaitetta ei saanut pois robotin työkalulaipan alta. Tästä tilasta toipuminen olikin yllättävän hankalaa robotin jarrutappien poistoprosessin johdosta. Käynnistettäessä robottia uudelleen robotti kiertää jokaista niveltään hieman, jotta jarrutappien poistaminen onnistuisi. Törmäysmittalaitteen ollessa jumittuneena tason ja robotin työkalulaipan väliin jarrutappien poistaminen piti tehdä tilanteessa, jossa robotti painaa törmäystestilaitetta noin 100 N voimalla. Toinen vaihtoehto olisi ollut avata jonkin nivelen suojakuori ja vapauttaa jarrut manuaalisesti, mutta tähän toimenpiteeseen olisi kuitenkin tarvittu toisen henkilön apua.

### **Saatujen mittaustulosten käsittely**

Saadut mittatulokset suodatettiin käyttämällä DQUV:n ohjeistuksen mukaista 100 Hz rajoitustaajuuden omaavaa Butterworthin alipäästösuodinta. Suodatus tehtiin jälkikäteen Matlab-ohjelmaa käyttämällä.

### **Mittausten virhetarkastelu**

Mittauslaitteen 3D-tulostetuista osista johtuen mittalaitte ei ole täysin jäykkä, vaan törmäysten yhteydessä esiintyy z-voimakomponenttien lisäksi myös x- ja y-voimakomponentteja. Nämä voimakomponentit olivat suuruudeltaan noin 5-10 prosenttia z-voimakomponentin suuruudesta. Kaikkien voimakomponenttien yhteenlaskua harkittiin, mutta lopulta päätettiin jättää x- ja y-komponentit kokonaan huomioimatta niiden väheisen merkityksen vuoksi. Optoforce HEX-E voima-anturin ominaisuuksista johtuen törmäysmittalaitteen kokonaisjousivakiota pienentää voima-anturin kokoonpuristuminen. Valmistajan ilmoittama puristuma on 0,3 mm voima-anturiin vaikuttavan voiman ollessa 200 N (Optoforce HEX-E datasheet, 2018).

Mittausten aikaan robotti oli vielä väliaikaisessa paikassaan, joten sen jalusta ei ollut kiinteästi lattiassa kiinni. Robotti oli kiinnitetty lattian päälle asetettuun 12 mm paksuun alumiinilevyyn, minkä johdosta törmäysten yhteydessä robotin jalustassa esiintyi värinää. Tämän värinän vaikutuksia mittaustuloksiin pidettiin kuitenkin vähäisenä.

DGUV suosittaa käyttämään törmäysmittauksissa 1000 Hz näytteenottotaajuutta. Käytetyn voima-anturin ohjelmisto tuki kuitenkin maksimissaan 500 Hz näytteenottotaajuutta. DGUV:n ohjeistuksessa kerrottiin erittäin nopeidenkin kontaktitilanteiden sisältävän korkeintaan 100 Hz taajuuksia (Collaborative robot systems, 2017). Nyquist—Shannon-teoreeman mukaan näytteenottotaajuuden tulee olla vähintään kaksinkertainen suurimpaan signaalin taajuuteen verrattuna (Luke 1999). Tästä johtuen 500 Hz näytteenottotaajuutta pidettiin riittävänä, eikä sen käyttöön todettu liittyvän merkittävää virhettä.

### 3.2 Matemaattinen mallintaminen

Pohjolainen (2010) mukaan matemaattisessa mallintamisessa monimutkainen todellisuuden ilmiö pelkistetään matemaattiseksi malliksi. Matemaattisen mallinnuksen aluksi on tunnistettava ongelma, jota mallintamisella yritetään ratkaista. Tämän jälkeen luodaan matemaattinen malli, yritetään ratkaista se ja pohditaan saatuja tuloksia. Tässä työssä tehtävässä matemaattisessa mallintamisessa on tavoitteena selvittää, kuinka paljon robotin käyttöohjekirjassa annettua pysähtymisaikaa on mahdollista pienentää ja millainen vaikutus sillä on suojaetäisyyteen.

Universal Robots 10-robotin käyttöohjekirjan pysähtymisajat on annettu täydelle kuormalle, suurimmalle mahdolliselle työkalupisteen nopeudelle ja täysin ojentuneelle käsivarrelle, jolloin työkalupiste liikkuu noin 1,3 metrin päässä robotin jalustasta (User manual UR10 CB3, 2018). Nämä pysähtymisajat ovat kuitenkin Vaisalan yhteistoimintasovelluksen kannalta virheellisiä ja johtaisivat ylimitoitettuihin suojaetäisyyksiin. Vaisalan yhteistoimintasovelluksessa robotin liikuttama kuorma on 10 kilogramman sijasta noin 1,5 kg. Taulukossa 1 esitetään Universal Robots 10-robotin pysähtymisajat täysin ojentuneelle käsivarrelle ja täydelle kuormalle. Taulukossa näkyvä TCP nopeusraja tarkoittaa robotin turva-asetuksissa suurimmaksi sallituksi nopeudeksi määritettyä arvoa. Robotin turvajärjestelmä valvoo, että tämä nopeusarvo ei ylity (User manual UR10 CB3, 2018). Mikäli arvo jostain syystä pääsee ylittymään, robotti suorittaa luokan 0 pysähdyksen (User manual UR10 CB3, 2018).

**Taulukko 1. UR10 pysähdysajat** (User manual UR10 CB3, 2018).

<b>TCP nopeusraja</b>	<b>Suurin pysähdysaika (ms)</b>
1,0 m/s	450,0
1,5 m/s	500,0
2,0 m/s	550,0
2,5 m/s	600,0
3,0 m/s	650,0

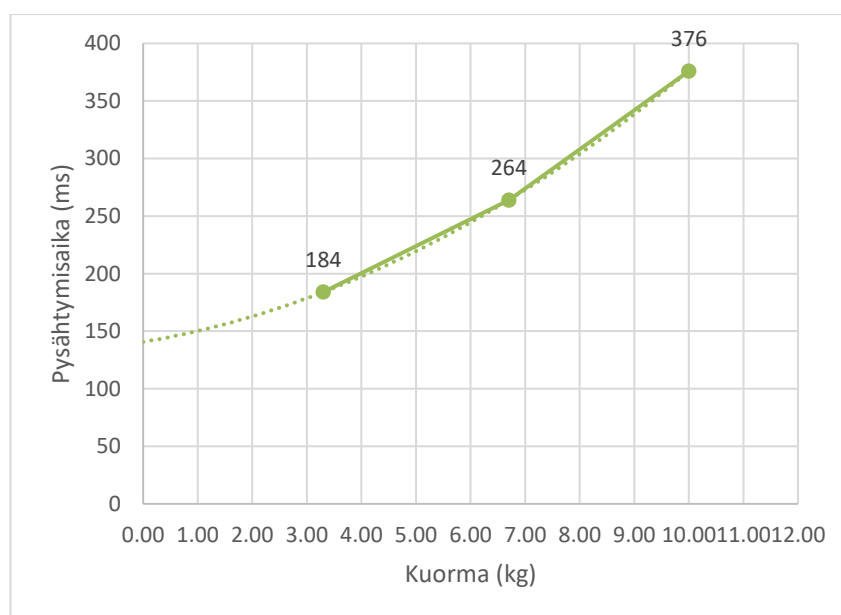
Käyttöohjekirjassa annettujen tietojen lisäksi Universal Robots tarjoaa internet-sivuillaan mittauspöytäkirjan, jossa esitetään Morten Kühnrichin vuonna 2014 tekemien pysähtymismittausten tulokset. Kühnrich suoritti mittaukset nivelien 0, 1 ja 2 pysähtymissuoristuskäytölle eri nivelkulmia ja kuormauksia käyttäen. Mittauksissa käytetyt kuormaukset olivat 3,3 kg, 6,6 kg sekä 10 kg. Kühnrichin tutkimuksessa kaikkein suurimmat pysähdysajat annettiin nivelelle 1, kun nivelien numerointi aloitetaan numerosta 0. (Kühnrich Morten)

Totuudenmukaisempien pysähtymisaikojen saamiseksi Kühnrichin tutkimuksen tuloksien perusteella päätettiin luoda matemaattinen malli robotin pysähtymiskäyttäytymisestä. Mallin tavoitteena on saada muodostettua yhtälöt, joiden avulla taulukon 1 arvoista voidaan johtaa approksimaatiot 1,5 kg:n kuorman pysähtymisajalle. Kühnrichin tutkimuksen perusteella koostettiin taulukko 2, johon kerättiin täysin ojentuneen käsivarren pysähtymisajat kolmella nopeudella ja kolmella kuormalla. Kühnrichin mittaustuloksista huomataan, että robotin kuormauksella on suuri vaikutus robotin pysähtymisaikaan. Karkeasti voidaan arvioida, että kuorman tiputtaminen kolmannekseen likimain puolittaa pysähdykseen tarvittavan ajan. Kühnrichin mittaustuloksista ei kuitenkaan saada selville pysähtymisaikoja 1,5 kg:n kuormaukselle. Lisäksi Kühnrichin mittaustulokset on annettu robotin nivelten kulmanopeutena, jolloin niiden hyödyntäminen riskiarviossa on hankalaa. Riskiarvion tueksi tarvitaan tietoa robotin pysähtymisajoista nopeuden yksikölle mm/s, jotta suojaetäisyyksien laskeminen on yksinkertaista.

**Taulukko 2.** Kühnrichin mittaustuloksista koostettu taulukko, jossa esitetaan pysähtymisajat eri kuormilla ja nopeuksilla.

	3,3 kg	6,6 kg	10 kg
<b>39,6 astetta/s</b>	72 ms	96 ms	128 ms
<b>79,2 astetta/s</b>	136 ms	192 ms	272 ms
<b>120 astetta/s</b>	184 ms	264 ms	376 ms

Kühnrichin mittaustulosten perusteella muodostettiin polynomista interpolaatiota hyväksikäyttämällä funktiot, joiden avulla voidaan laskea pysähtymisajat 1,5 kg kuormaukselle. Kühnrichin mittaustulosten perusteella luotujen pisteiden kautta pakotettiin siis kulkemaan polynomi. Interpolointi tehtiin aluksi mittaustuloksille, joiden saamiseen oli käytetty 100% nopeutta. Tällöin tulokseksi saatiin kuvan 11 mukainen kuvaaja.



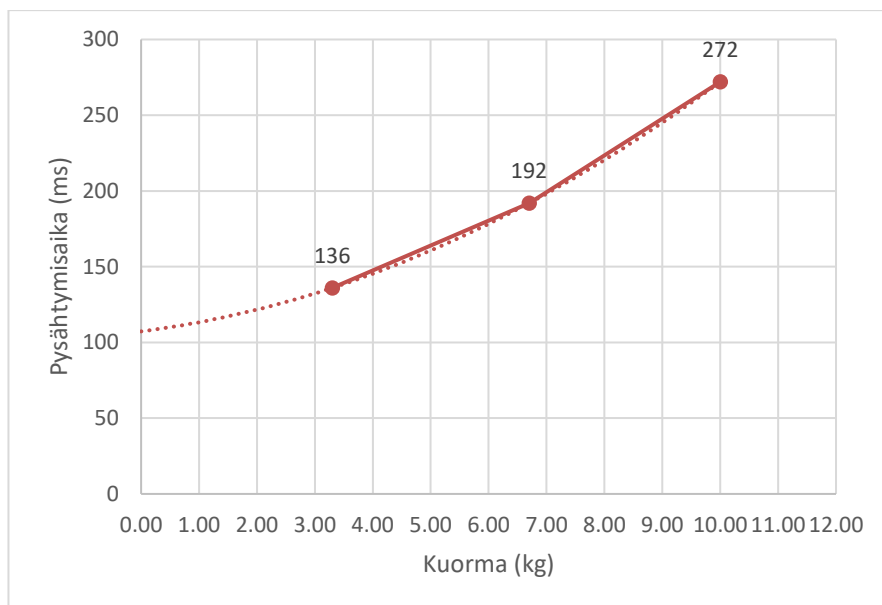
**Kuva 11.** Robotin pysähtymisaika kuorman funktiona 100% nopeudella.

Interpolaation avulla 100% nopeuden pysähtymisajalle saatiin muodostettua funktio

$$y = 1,55x^2 + 7,99x + 140,71.$$

Seuraavaksi tehtiin polynominen interpolaatio 66% nopeudella saaduille mittaustuloksille. Saatu kuvaaja esitetään kuvassa 12.



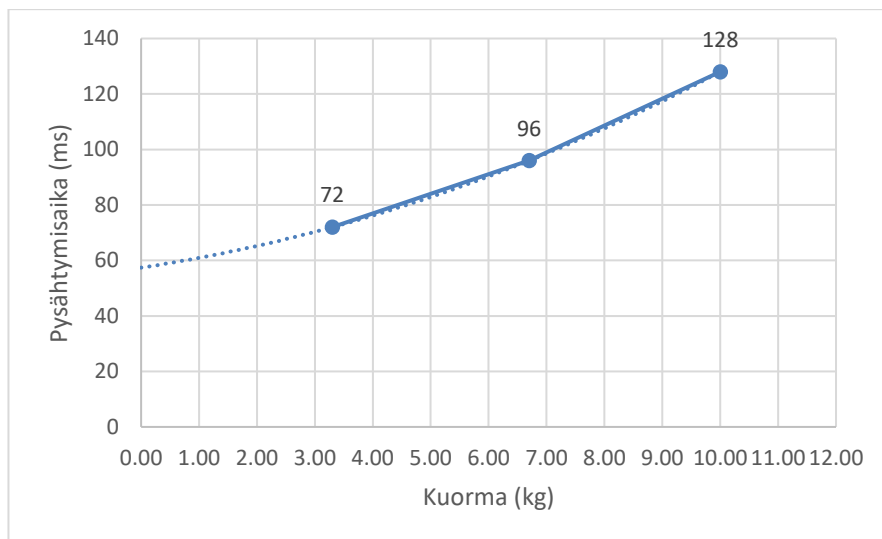


**Kuva 12.** Robotin pysähtymisaika kuorman funktiona 66% nopeudella.

Interpolaation avulla muodostettiin pysähtymisajalle funktio

$$y = 1,60x^2 + 4,87x + 107,29.$$

Viimeisenä vaiheena oli suorittaa interpolaatio 33% nopeudella saaduille mittaustuloksille. Saatu kuvaaja esitetään kuvassa 13.



**Kuva 13.** Robotin pysähtymisaika kuorman funktiona 33% nopeudella.

Interpolaation avulla muodostettiin pysähtymisajalle funktio

$$y = 0,39x^2 + 3,12x + 57,41.$$

## 4. TULOKSET

Tässä luvussa esitetään työn aikana saadut tulokset.

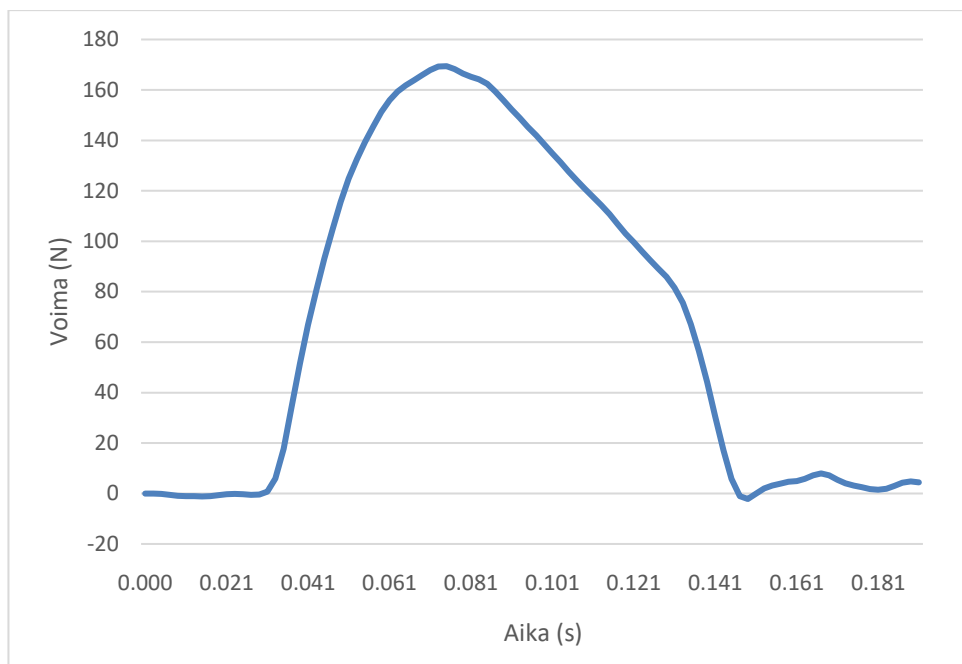
### 4.1 Kokeellisen tutkimuksen tulokset

Törmäystesteistä saatu data suodatettiin DGUV:n ohjeistuksen mukaisesti Butterworthin alipäästösuodinta käyttämällä. Testien tulokset on koottu taulukkoon 3.

*Taulukko 3. Törmäystestien tulokset.*

<i>100 mm/s 75 N/mm</i>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>Keskiarvo</b>
<b>Voiman vaikutusaika (ms)</b>	163,0	166,0	167,0	165,3
<b>Maksimivoima (N)</b>	100,9	100,8	102,2	101,3
<i>100 mm/s 118 N/mm</i>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>Keskiarvo</b>
<b>Voiman vaikutusaika (ms)</b>	164,0	162,0	163,0	163,0
<b>Maksimivoima (N)</b>	107,2	106,8	107,5	107,2
<i>200 mm/s 75N/mm</i>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>Keskiarvo</b>
<b>Voiman vaikutusaika (ms)</b>	113,0	113,0	112,0	112,7
<b>Maksimivoima (N)</b>	170,1	169,9	169,4	169,8

Voiman vaikutusajaksi on laskettu aika, joka kuluu voima-arvon 10 N ylityksestä siihen, että voima-arvo on jälleen alle 10 N. Tuloksista voidaan nähdä, että mittaustapahtuma oli hyvin toistettava. Nopeudella 200 mm/s törmäysvoimat alkoivat kasvaa jo niin suuriksi, että ne ylittivät teknisen spesifikaation ISO/TS 15066 ihmisen käsille antamat raja-arvot. Tästä syystä nopeasti huomattiin, että puristavassa törmäyksessä käsille turvallinen nopeus löytyy 100 mm/s ja 200 mm/s nopeuksien väliltä. Kuvassa 14 nähdään erään törmäyksen törmäysvoima graafisesti esitettynä ajan funtiona. Kuvaajasta hahmottaa selkeästi, että robotti peruuttaa törmäyksen jälkeen hieman tulosuuntaansa, mistä johtuen voima-arvo palaa takaisin lähtötasolle välittömästi törmäyksen jälkeen. Kuvaajasta nähdään myös, että voima kasvaa ainoastaan 42 millisekunnin ajan. Robotin pysähdystoiminto näyttäisi siis toimivan hyvin näin hitaalla nopeudella liikuttaessa.



**Kuva 14.** Törmäystilanne nopeudella 200 mm/s jouseen, jonka jousivakio on 75 N/mm.

Robotti peruutti törmäyksen tunnistettuaan tulosuuntaansa, joten voiman vaikutusaika oli hyvin lyhyt. Teknistä spesifikaatiota ISO/TS 15066 tulkittaessa huomattiin, että mikäli törmäys kestää alle 500 ms törmäyksestä syntyvät voimat saavat olla jopa tuplasti suurempia. Yli 200 N voima kohdistettuna kämmeneen vaikutti kuitenkin liian suurelta, joten puristuksen aiheuttavan törmäyksen ohjeistuksen noudattaminen vaikutti tässä kohtaa järkevämältä.

Tuotteen alapinta on pinta-alaltaan noin 4 cm<sup>2</sup>, joten törmäysvoiman ollessa 101,2 N maksimipaineeksi saadaan  $p=F/A$  kaavalla laskettua 25,3 N/cm<sup>2</sup>. Tämä paine on selkeästi alle teknisen spesifikaation ISO/TS 15066 suosituksen. Mikäli törmäyspinta-ala olisi 1 cm<sup>2</sup>, olisi törmäyksen aiheuttama paine tässä tapauksessa 101,2 N/cm<sup>2</sup>, mikä on myös selvästi alle teknisen spesifikaation suosituksen.

Törmäystestissä kokeiltiin myös kovempia nopeuksia aina 600 mm/s nopeuteen saakka, mutta robotin tarpeettoman rasituksen välttämiseksi nämä testit tehtiin vain kokeiluluonteisesti, eikä toistomittauksia näillä nopeuksilla suoritettu. Näissä testeissä huomattiin, että nopeuksilla 100 mm/s, 200 mm/s ja 300 mm/s robotin törmäysentunnistus toimii mainiosti ja robotti suoritti luokan 2 suojapysähdyksen. Luokan 2 pysähdyksen yhteydessä robotti myös peruuttaa hieman tulosuuntaansa, joten puristustilannetta ei aiheudu. Törmäysnopeuksilla 400 mm/s, 500 mm/s ja 600 mm/s robotin pysähdys tapahtui luokan 0 pysähdyksenä, joka aiheuttaa virtojen katkaisemisen ja robotin ajautumisen pois liikeradaltaan. Myös robotin jarrut kytkeytyvät luokan 0 pysähdyksessä päälle ja robotilta katkaistaan virta. Tämän johdosta voima-anturiin vaikutti 400 mm/s, 500 mm/s ja 600 mm/s nopeuksilla tapahtuneiden törmäysten jälkeen jatkuvasti noin 100 Newtonin voima.

## 4.2 Matemaattisen mallintamisen tulokset

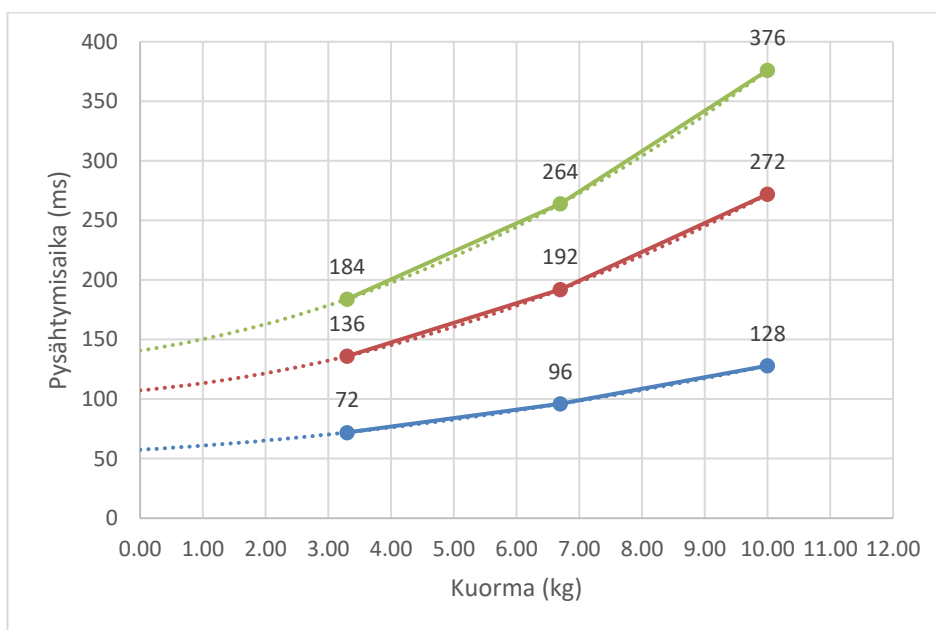
Polynomista interpolaatiota hyväksikäyttäen Universal Robots 10-robotille määritettiin pysähtymissuorituskykyä kuvaavat funktiot kolmelle eri nopeudelle. Funktioissa  $x$  tarkoittaa robotin kantamaa kuormaa:

1. Nopeudelle 120 %/s muodostettu funktio  $y = 1,55x^2 + 7,99x + 140,71$

2. Nopeudelle 79,2 %/s muodostettu funktio  $y = 1,60x^2 + 4,87x + 107,29$

3. Nopeudelle 39,7 %/s muodostettu funktio  $y = 0,39x^2 + 3,12x + 57,41$

Nämä funktiot esitetään graafisesti kuvassa 15. Kuvasta nähdään selkästi, että robotin kuormauksen vähentämisellä on suuremmilla nopeuksilla huomattava vaikutus pysähtymisaikaan. Kuvasta nähdään myös, että kuormauksen vaikutus pysähtymisaikaan pienenee nopeuden pienentyessä.



**Kuva 15.** Matemaattisen mallinnuksen avulla robotin pysähtymisajalle muodostetut funktiot.

## 5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä luvussa analysoidaan edellisen luvun tuloksia tarkemmin ja annetaan suositus yhteistoimintasovelluksen toteuttamistavasta. Lisäksi arvioidaan yhteistoimintasovelluksen hyötyjä ja haittoja.

### 5.1 Tulosten analysointi

#### Kokeellisen tutkimuksen tulosten analysointi

Tehdyissä törmäystesteissä käytettiin törmäysmittalaitteessa kahta erilaista joustia. Toisen jousen jousivakio oli 75 N/mm ja toisen 118 N/mm. DGUV:n mukaan mittalaitteen jousella ei ole suurta merkitystä saatuihin mittaustuloksiin (Collaborative robot systems, 2017). Erilaisten jousien käyttämisellä haluttiin selvittää, onko DGUV:n toteamuksessa perää. Saatujen mittaustulosten perusteella voidaan todeta, että jäykemmän jousen käyttäminen nostaa törmäyksestä aiheutuvaa voimaa noin kuudella prosentilla.

Universal Robots-robotin turva-asetuksista voidaan määrittää suurimmat törmäyksen yhteydessä sallitut mekaanisen voiman ja mekaanisen tehon raja-arvot. Tehtyjen törmäykestien perusteella näihin asetuksiin ei voida luottaa varauksetta. Ainoastaan erittäin hitailla nopeuksilla (100 mm/s) mitatut voimatasot vastasivat robotin turva-asetuksiin asetettuja voimarajaa. Korkeammilla nopeuksilla robotin turva-asetusten voimaraja ylittyi reilusti. Testien perusteella voidaan todeta, että suurin yhteistoimintasovelluksen riski aiheutuu puristusta aiheuttavista törmäyksistä. Tätä johtopäätöstä tukee myös Haddadin et al. tekemä tutkimus (Haddadin et al. 2009). Suunnittelussa onkin pyrittävä eliminoimaan puristumisvaaraa aiheuttavia robotin liikkeitä. Mikäli puristavan törmäyksen aiheuttavia tilanteita jää, on huolehdittava, että robotin liikenopeus on tarpeeksi matala.

Teknisen spesifikaation ISO/TS 15066 ohjeistuksessa annetaan ohjeita ainoastaan voimarajojen asetukseen. Kuitenkin myös maksimaalisen mekaanisen tehon rajoitus on tärkeää, sillä esimerkiksi erittäin nopeissa törmäystilanteissa hetkellinen mekaaninen teho voi kasvaa suureksi voiman pysyessä kuitenkin alle riskiarviossa määritettyjen sallittujen raja-arvojen. Universal Robots-robotin tehon ja voiman rajoitustoiminto perustuu niveltä vääntömomentin mittaamiseen. Tämä vääntömomentti saadaan selville yhdistämällä muun muassa moottoreiden virta- ja asematietoja robotin kalibrointitietoihin. Saadun voima-arvon perusteella lasketaan myös mekaaninen teho kaavalla

$$P = \frac{F\Delta x}{\Delta t}, \quad (13)$$

jossa  $F$  vääntömomentin perusteella laskettu voima-arvo,  $\Delta x$  on robotin kulkema matka tarkasteluhetkellä ja  $\Delta t$  on tarkasteltava aikaväli.

Työn aikana tehdyissä törmäystesteissä ei tutkittu tehon rajoituksen vaikutuksia mittaustuloksiin. Tehtyjen laskujen mukaan törmäystesteissä ilmenneiden voimien mekaaniset tehot olivat sen verran pieniä, että tässä kyseisessä sovelluksessa voiman rajoitus toimii tehon rajoitusta paremmin. Mikäli esimerkiksi tarkastellaan yhtä törmäytestin törmäystä, jossa voima kasvoi nolasta 100 newtoniin noin 58 ms aikavälillä siirtymän ollessa noin 5 mm, saadaan laskettua mekaaniselle teholle kaavaa 13 käyttämällä arvo

$$P = \frac{F\Delta x}{\Delta t} = \frac{100 \text{ N} \times 0,005 \text{ m}}{0,058 \text{ s}} = 8,621 \text{ W}.$$

Tässä esimerkkitilanteessa mekaanisen tehon arvoksi saadaan noin 8,6 W. Universal Robots-robotin pienin mahdollinen rajoitus mekaaniselle teholle on 80 W, joten tämän esimerkin avulla voidaan todeta, että tehon rajoitus on käyttökelpoinen suurilla nopeuksilla tapahtuvissa törmäyksissä, joissa voiman vaikutusaika on lyhyt ja siirtymät suuria.

Teknisen spesifikaation ISO/TS 15066 mukaan operaattorin tulee pystyä vapauttamaan itsensä törmäyksen aiheuttamasta puristustilanteesta. Mittausten mukaan nopeusarvoa 300 mm/s suuremmilla nopeuksilla itsensä vapauttaminen hankaloituu selvästi, sillä nivelien jarrut kytkeytyvät päälle. Universal Robots-robotin nivelet on varustettu kitkalukoilla, jotka aukeavat, kun niveleen vaikutetaan noin 500 N voimalla. On kuitenkin tilannekohtaista ja henkilöstä riippuvaa, pystyykö puristuksiin jäänyt henkilö tuottamaan nivelien vapautukseen vaadittavaa voimaa.

Tärkeimpänä törmäysmittausten johtopäätöksenä on, että Universal Robots 10-robotin suurin sallittu nopeus tulee rajoittaa nopeuksien 100 mm/s ja 200 mm/s väliin, kun yhteistoimintasovelluksessa on riski törmäykselle, jossa jokin ihmisen ruumiinosa jää puristuksiin. Universal Robots 10-robotilla ei ole nivelissään voima- ja/tai vääntöantureita, joten sen voim rajoitustoiminto perustuu nivelten vääntömomentin mittaamiseen. Universal Robots-robotin voim rajoitustoiminto ei toteutustavastaan johtuen yllä herkkyydeltään kalliimpien teho- ja voim arajoitettujen robottien tasolle, mutta tämä ei kuitenkaan poissulje mahdollisuutta käyttää robottia tehon ja voiman rajoitukseen perustuvissa yhteistoimintasovelluksissa, kunhan puristusta aiheuttavaan törmäykseen liittyvät asiat huomioidaan yhteistoimintasovelluksen suunnittelussa.

Robotin tulee siis liikkua hyvin hitaasti, mikäli puristusta aiheuttavan törmäyksen riski on olemassa. Vertailun vuoksi lasketaan robotin maksiminopeus tilanteelle, jossa törmäys ei aiheuta puristusta. Robotin yhteistoimintatilassa käyttämän suurimman sallitun liikenopeuden laskemiseksi valitaan ensin teknisestä spesifikaatiosta ISO/TS 15066 tutkimuksen kohteena olevan ruumiinosan efektiivinen jousivakio sekä efektiivinen

massa. Jousivakioarvoksi valitaan käsille ja sormille annettu 75 N/mm, joka on samalla suurin mahdollinen jousivakioarvo, kun pään alueen jousivakiot jätetään huomiotta. Efektiiviseksi massaksi valitaan 2 kg, joka on käsivarren alaosalle annettu arvo.

Ensimmäisenä vaiheena on selvittää, rajoittaako robotin maksiminopeutta teknisessä spesifikaatiossa ISO/TS 15066 annettu voima-arvo vai painearvo. Tämä tehdään laskemalla maksimiarvo törmäyksen ihmiskehoon siirtämälle energialle käyttämällä luvun 2 kaavaa 8. Ensiksi lasketaan arvo tilanteelle, jossa voima-arvo on rajoittava tekijä. Tämän jälkeen lasketaan arvo tilanteelle, jossa painearvo on rajoittava tekijä. Jälkimmäisessä laskussa käytettävä pinta-alan arvo perustuu teknisen spesifikaatioon, jossa kerrotaan annettujen voima- ja painearvojen pätevän 1 cm<sup>2</sup> kokoiselle törmäyspinta-alalle.

$$E = \frac{F_{max}^2}{2k} = \frac{(140 \text{ N})^2}{2 \times 75 \text{ N/mm}} \approx 130 \text{ Nmm}$$

$$E = \frac{F_{max}^2}{2k} = \frac{A^2 p_{max}^2}{2k} = \frac{100^2 \text{ mm}^2 \times 1,8^2 \text{ N/mm}^2}{2 \times 75 \text{ N/mm}} = 216 \text{ Nmm}$$

Laskujen tuloksista huomataan, että 140 newtonin voimalla tapahtuvassa törmäyksessä ihmiskehoon siirtyy energiaa noin 130 Nmm, joka vastaa noin 0,13 joulea. Lisäksi huomataan, että 180 N/cm<sup>2</sup> paineella tapahtuvassa törmäyksessä ihmiskehoon siirtyy energiaa noin 216 Nmm, mikä vastaa noin 0,22 joulea. Näistä tuloksista voidaan päätellä, että tässä tapauksessa tutkimuksessa on tärkeämpää tarkastella voima-arvoa robotin liikenopeutta rajoittavana tekijänä ja käyttää siis ihmisvartaloon siirtyvän energian rajana 0,13 joulea. On tärkeää huomata, että tilanne saattaa muuttua, mikäli törmäyspinta-ala muuttuu.

Seuraavaksi aloitetaan ihmisen ja robotin redusoidun massan laskeminen käyttämällä luvun 2 kaavaa 10 robotin efektiivisen massan laskemiseksi:

$$m_R = \frac{M}{2} + m_L = \frac{28,90 \text{ kg}}{2} + 1,50 \text{ kg} = 15,95 \text{ kg}$$

Saatu tulos sijoitetaan redusoidun massan kaavaan, joka on luvussa 2 esitelty kaava 9:

$$\mu = \left( \frac{1}{m_H} + \frac{1}{m_R} \right)^{-1} = \left( \frac{1}{2,00 \text{ kg}} + \frac{1}{15,95 \text{ kg}} \right)^{-1} \approx 1,78 \text{ kg}$$

Ennen suurimman sallitun nopeuden laskemista edellä laskettu redusoitu massa muunnetaan newtoneiksi, jolloin sitä voidaan käyttää robotin suurimman sallitun nopeuden laskentaan yhteistoiminta-alueella käyttämällä luvun 2 kaavaa 12:

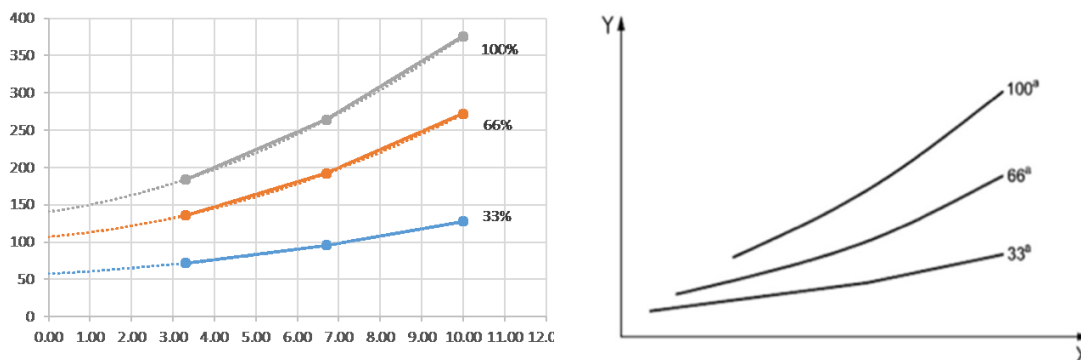
$$v_{rel,max} = \frac{p_{max}A}{\sqrt{\mu k}} = \frac{1,8^2 \frac{N}{mm^2} \times 100 mm^2}{\sqrt{17,46 N \times 75 N/mm}} = 886,8 mm/s$$

Tekniseen spesifikaatioon ISO/TS 15066 perustuvien laskujen perusteella saatiin selvitettyä, että tutkittavan robotin liikenopeus voi olla yhteistoiminta-alueella 887 mm/s, kun yhteistoiminta-alueella ei ole riskiä puristusta aiheuttavalle törmäykselle ja mahdollinen törmäys kohdistuisi ihmisen käteen. Saatu tulos vaikuttaa uskottavalta, mutta on syytä huomioda sen perustuvan hyvin karkeisiin laskutoimituksiin. Laskutoimitukset perustuvat törmäysenergian tarkasteluun, joten ne eivät huomioi robotin todellista pysähtymissuorituskykyä ja voima-anturoinnin herkkyyttä. Eri valmistajien teho- ja voimarajoitettujen robottien välillä voi olla suuriakin eroja pysähtymissuorituskyvyssä riippuen esimerkiksi siitä, onko robotti varustettu voima-antureilla. Mikäli riskinarviointiprosessissa käytetään ainoastaan laskujen perusteella määritettyä maksiminopeutta, on turvallisuuden todistaminen varsin hataralla pohjalla. Laskujen tueksi olisi tärkeää saada myös mittaamalla hankittua tietoa. Haasteena on kuitenkin se, että vapaan törmäyksen mittaaminen on monimutkaisempaa kuin puristusta aiheuttavan törmäyksen mittaaminen, eikä vapaan törmäyksen mittaamiseen ole tällä hetkellä tarjolla ohjeistusta.

### **Matemaattisen mallintamisen tulosten analysointi**

Universal Robots 10-robotin käyttöohjekirjassa ilmoitetut pysähtymisajat ovat tilanteelle, jossa robotti kantaa 10 kilogramman kuormaa. Vaisalan yhteistoimintasovelluksen tapauksessa liikuteltava kuorma on ainoastaan noin 1,5 kg, joten käyttöohjekirjan pysähtymisajat ovat ylimitoitettuja. Robotin pysähtymissuorituskyvystä laadittiin matemaattinen malli käyttämällä hyväksi robotin valmistajan tekemiä pysähtymismittauksia sekä polynomista interpolaatiota. Kuvassa 16 on yhdistettynä matemaattisen mallin avulla muodostetut pysähtymissuorituskykykäyrät kolmelle nopeudelle sekä standardissa SFS-EN ISO 10218-1 esitetty kuva. Verrattaessa matemaattisen mallin avulla muodostettuja käyriä standardissa SFS-EN ISO 10218-1 annettuun kuvaan voidaan havaita, että käyrät näyttävät keskenään samankaltaisilta. Tämä antaa viitteitä siitä, että mallin muodostamisessa on onnistuttu.





**Kuva 16.** Matemaattisen mallin avulla muodostettujen pysähtymissuorituskykyä kuvaavien käyrien vertailu standardissa SFS-EN ISO 10218-1 esitettyyn havainnekuvaan.

Matemaattisen mallinnuksen yhteydessä muodostettujen funktioiden avulla laskettiin robotin pysähtymisajat 1,5 kg:n kuormalle. Tulokset on esitetty taulukossa 4. Taulukossa esitettäviä pysähtymisaikoja ei pystytä hyödyntämään sellaisenaan, sillä pysähtymisajat on annettu yksikössä astetta/s, kun riskiarviossa käytettävä yksikkö on mm/s.

**Taulukko 4.** Robotin pysähtymissuorituskyky 1,5 kg:n kuormauksella.

	1,5 kg
39,6 astetta/s	63 ms
79,2 astetta/s	119 ms
120,0 astetta/s	157 ms

Taulukossa 4 esitettyjen pysähtymisaikojen avulla pystytään kuitenkin arvioimaan kuorman muutoksen vaikutusta robotin pysähtymisaikaan. Verrattaessa taulukon 4 pysähtymisaikoja taulukossa 2 kymmenen kilogramman kuormalle annettuihin pysähtymisaikoihin huomattiin seuraavat asiat:

1. Nopeudella 39,7 %s kuorman laskeminen 8,5 kg:lla aiheuttaa noin 50 % tiputuksen pysähtymisajassa.
2. Nopeudella 79,2 %s kuorman laskeminen 8,5 kg:lla aiheuttaa noin 56 % tiputuksen pysähtymisajassa.
3. Nopeudella 120 %s kuorman laskeminen 8,5 kg:lla aiheuttaa noin 58 % tiputuksen pysähtymisajassa.

Laskemalla näistä arvoista keskiarvo saadaan selville, että pudotettaessa robotin kuormaa 8,5 kg:lla pysähtymiseen kuluva aika laskee noin 55 %. Tätä tietoa käytettiin hyödyksi laskettaessa lopullisia yhteistoimintasolun suunnittelun tukena käytettäviä

pysähtymisaikoja. Taulukon 1 pohjalta laskettiin edellä mainittuja tietoja hyväksikäyttäen uudet pysähtymisajat, jotka on esitetty taulukossa 5. Näistä tuloksista huomataan, että pysähtymiseen kuluva aika laskee huomattavasti. Esimerkiksi nopeudella 3 m/s pysähtymisaika tippui noin 357,5 ms. Tämä helpottaa huomattavasti yhteistoimintasolun suunnittelua, sillä turvaetäisyyksille tarvitsee varata vähemmän tehtaan arvokasta lattiapinta-alaa.

***Taulukko 5.** Matemaattisen mallin pohjalta lasketut uudet pysähtymisajat.*

<b>TCP nopeusraja</b>	<b>Suurin pysähdysaika (ms)</b>
1,0 m/s	202,5
1,5 m/s	225,0
2,0 m/s	247,5
2,5 m/s	270,0
3,0 m/s	292,5

## **5.2 Suositus yhteistoimintasovelluksen toteutuksesta**

Tässä luvussa pohditaan yhteistoimintatapojen valintaa, perustellaan tehty valinta ja esitetään suositeltava pohjapiirustus yhteistoimintasolua varten.

### **5.2.1 Suositus yhteistoimintatavasta**

Tutkimusosiossa saatujen tuloksien perusteella Vaisalan yhteistoimintasovelluksessa käytettäväksi yhteistoimintatavaksi suositellaan nopeuden ja vähimmäisetäisyyden valvontaa. Päätös tehtiin arvioimalla kolmea kriteeriä, jotka olivat tehokkuus, käyttömukavuus ja turvallisuus. Tehon ja voiman rajoitukseen perustuvan yhteistoimintasolun kohdalla robotin liikenopeudet olisivat yhteistoiminta-alueella nopeuden ja vähimmäisetäisyyden valvontaan perustuvaa yhteistoimintasolua hitaampia, mikä kasvattaisi yhteistoimintasolun tahtiaikaa. Toisaalta taas tehon ja voiman rajoitukseen perustuvassa yhteistoiminnassa operaattori voi työskennellä hieman lähempänä robottia, jolloin ylimääräiseen liikkumiseen kuluu vähemmän aikaa. Laskettujen uusien pysähtymisaikojen ansiosta nopeuden ja vähimmäisetäisyyden valvonnan suojaetäisyysvaatimus on kuitenkin niin lyhyt, että sillä ei ole merkittävää vaikutusta tehokkuuteen.

Nopeuden ja vähimmäisetäisyyden valvonnan tapauksessa ihminen tulee työskentelemään jatkuvasti yhteistoiminta-alueen vieressä, joten ihmisen sijainnin

huomioimisen lisäksi täytyy huomioida myös robotin sijainti. Mikäli ainoastaan ihmisen sijainti huomioitaisiin, pysähtelisi robotti tarpeettoman usein, jolloin tehokkuus kärsisi. Universal Robots-robotin turva-asetukset tarjoavat mahdollisuuden jakaa robotin työaluetta eri vyöhykkeisiin. Robotin pääsy näille vyöhykkeille voidaan estää kokonaan tai vaihtoehtoisesti robotin tila voidaan näillä alueilla muuttaa reduced-tilaan. Valoverhoa käyttämällä voidaan havaita milloin ihminen työskentelee yhteistoiminta-alueella. Mikäli robotti ei ole yhteistoiminta-alueen läheisyydessä, ei robotin ole tarpeen pysähtyä. Mikäli ihminen on yhteistoiminta-alueella ja robotin tilaksi on muutettu reduced-tila, robotti suorittaa turvaluokitellun valvotun pysähdysten ja pysyy paikoillaan, kunnes ihminen on poistunut yhteistoiminta-alueelta. Tällaisen kytkennän tekeminen ei onnistu suoraan robotin turvaohjaimella, vaan tähän tarkoitukseen täytyy hankkia erillinen turvaluokiteltu PLC. Edellä kuvaillusta toteutustavasta johtuen robotti pysähtelee ainoastaan satunnaisesti, joten sillä ei ole merkittävää vaikutusta tehokkuuteen. Tehokkuutta arvioitaessa nopeuden ja vähimmäisetäisyyden valvontaan perustuva yhteistoimintasovellus on siis parempi vaihtoehto.

Nopeuden ja vähimmäisetäisyyden valvonnan yhteydessä tapahtuva ihmisen sijainnin havainnointi takaa operaattorille vaivattoman työskentelyn, sillä robotti pysähtyy automaattisesti ihmisen käden ollessa alle vähimmäisetäisyysvaatimuksen päässä robotista. Tehon ja voiman rajoituksen tapauksessa robotti voi päästä koskettamaan operaattoria, mikä voi aiheuttaa operaattorille ylimääräistä rasitetta. Operaattorin arveltiin jännittävän etenkin sormien jäämistä robotin tarttujan väliin, sillä tuotteen asettaminen varastoalueelle tapahtuu kokoonpanon jälkeen vauhdikkaasti sen suuremmin ajattelematta. Käyttömukavuuden ollessa arviointikriteerinä nopeuden ja vähimmäisetäisyyden valvonta on siis parempi vaihtoehto.

Viimeisenä arviointikriteerinä oli yhteistoimintasovelluksen turvallisuus. Turvallisen tehon ja voiman rajoitukseen perustuvan yhteistoimintasovelluksen toteutus olisi robotin ominaisuuksien puolesta mahdollista, mikäli puristusta aiheuttavien törmäystilanteiden ollessa mahdollisia robotin liikenopeus asetettaisiin nopeuksien 100 mm/s ja 200 mm/s väliin ja puristusta aiheuttamattomien törmäysten ollessa mahdollisia robotin liikenopeus asetettaisiin suunnilleen nopeudelle 850 mm/s. Tehon ja voimarajoitetun yhteistoimintasovelluksen turvallisuuden todistaminen vaatisi kuitenkin nopeuden ja vähimmäisetäisyyden valvonnan käyttämiseen verrattuna paljon työtä ja aiheuttaisi tulkintaongelmia määritettäessä törmäystilanteiden turvallisuutta. Myös robotin työkalun turvallisuuden varmistaminen olisi hankalaa. Teknisen spesifikaation ISO/TS 15066 mukaan sormeen kohdistettava suurin voima saa olla maksimissaan 140 N, kun taas Vaisalassa käytössä oleva tarttuja tuottaa suurimmillaan 220 N voiman ( $\pm 10\%$ ). Tarttujan tuottama voima on säädettävissä, mutta koska tarttujan voimarajoitusominaisuuden luotattavuudesta ei anneta mitään suoritustasoarviota, sitä ei voida suositella käytettävän yhteistoimintasovelluksen turvaominaisuutena. Tästä johtuen riskiarviossa jouduttaisiin käyttämään tarttujan suurimpana voimatasona teknisen spesifikaation suositukset

ylittävää 242 N voimaa. Turvallisuuden näkökulmasta nopeuden ja vähimmäisetäisyyden valvonnan käyttäminen yhteistoimintatapana on siis parempi vaihtoehto.

## 5.2.2 Suositus yhteistoimintasolusta

Robottisolun suositellaan jaettavan kolmeen alueeseen, jotta yhteistoimintasolun tahtiaika pysyisi nopeana ja riskiarviointi yksinkertaisena. Nämä alueet ovat nimeltään yhteistoiminta-alue, robotin työalue sekä operaattorin työalue. Yhteistoiminta-alueella sijaitsee varasto, johon operaattori asettaa kokoonpantuja tuotteita ja robotti vastaavasti palauttaa valmiita tuotteita. Robotin työalue on puolestaan alue, jossa robotti pääasiassa työskentelee. Ihmisen kulku tälle alueelle on estetty. Operaattorin omalla työalueella tapahtuu tuotteiden kokoonpano sekä niiden siirtäminen seuraavaan tuotantovaiheeseen. Tällä alueella ihmiset voivat liikkua vapaasti eikä se vaikuta millään tavalla robotin toimintaan.

Yhteistoiminta-alueen suunnittelussa tärkeimpänä suunnittelukriteerinä on ergonomia ja turvallisuus. Yhteistoiminta-alueen tason korkeudeksi suositellaan 900 mm, joka on todettu muissa Vaisalan työpisteissä hyväksi korkeudeksi. Robotin työalueen tärkeimpänä suunnittelukriteerinä on robotin kannalta optimaalinen prosessilaitteiden sijoittelu, mutta huomioon on otettava myös ihmisen ergonomiset vaatimukset, sillä ihmisen tulee olla tarvittaessa mahdollista työskennellä robotin paikalla. Lisäksi prosessilaitteiden ja robotin väliin tulee jäädä riittävästi tilaa lähes päivittäisiä huoltotoimenpiteitä varten. Operaattorin oman työalueen suunnittelussa tulee huomioida ergonomia, materiaalin virtaus sekä mahdollisimman lyhyet etäisyydet. Ergonomian näkökulmasta tärkeää on kokoonpanossa käytettävien materiaalien asettelu siten, että niiden poiminta onnistuu ilman kurottelua.

Turvallisuuden varmistamiseksi henkilöstön koulutus tulee olemaan tärkeä osa tuotantovaiheen automatisointia. Selkeiden tehtävärajojen määrittämiseksi operaattoreille ei anneta erillistä robotin ohjelmointi- ja vianselvityskoulutusta, vaan heidän kohdallaan keskitytään robotin toimintatapojen selitykseen sekä turvalliseen yhteistoiminta-alueella toimimiseen. Ylläpitotiimin vastuulle suositellaan annettavan kaikki yhteistoimintasolun ylläpitoon ja vianselvitykseen liittyvät toimenpiteet. Vaaratilanteet aiheutuvat yleensä huoltotoimenpiteiden aikana, joten ylläpitotiimin robotiikkakoulutukseen tulee panostaa. Myöhemmin käsiteltävässä riskiarviossa käsitellään tarkemmin riskejä, joita liittyy sekä operaattoreiden että ylläpitotiimin työskentelyyn.

Aikaisemmin määritettyjen pysähtymisaikojen perusteella lasketaan yhteistoiminta-alueella vaadittava suojaetäisyys. Suojaetäisyyksien laskentaan käytetään taulukosta 7 saatavaa nopeuden 1,0 m/s pysähtymisaikaa 202,3 ms. Ensin lasketaan operaattorin liikkeen vaikutus suojaetäisyyteen kaavalla 4. Laskussa käytettävä robottijärjestelmän reaktioaika 24 ms perustuu robotin käyttöohjekirjan tietoihin (User manual UR10 CB3,

2018). Käytettävän optisen turvalaitteen reaktioaika 15 ms perustuu Pilzin valoverhon tekniseen spesifikaatioon (Pilz PSEN op4F, 2018).

$$S_h = 1,6 \text{ m} \times (T_r + T_s) = 1,6 \text{ m} \times (0,024 \text{ s} + 0,015 \text{ s} + 0,2023 \text{ s}) = 0,2896 \text{ m}.$$

Seuraavaksi määritetään robottijärjestelmän kulkema matka edellä mainitun 24 ms reaktioajan aikana. Määrittäminen tehdään kaavalla 5

$$S_r = v_r(t_0) \times T_r = 1,0 \text{ m/s} \times 0,024 \text{ s} = 0,024 \text{ m},$$

jossa TCP nopeus 1,0 m/s on robotin turva-asetuksissa maksiminopeudeksi asetettu arvo.

Tämän jälkeen lasketaan robotin pysähtymismatka  $S_s$  kaavalla 6

$$S_s = \int_{t_0+T_r}^{t_0+T_r+T_s} v_s(t) dt = \int_{0,024}^{0,2263} 1,0 \frac{\text{m}}{\text{s}} dt = 0,2023 \text{ m},$$

jossa ajan funktiona muuttuvan pysähtymisnopeuden  $v_s$  lähtöarvoksi valittiin robotin turvajärjestelmään määritetty maksimaalinen työkalupisteen nopeus 1,0 m/s.

Seuraavaksi lasketaan lähestymisetaisyys  $C$  kaavalla 1

$$C = 8 \times (d - 14) = 8 \times (14 \text{ mm} - 14) = 0 \text{ mm} = 0,0 \text{ m},$$

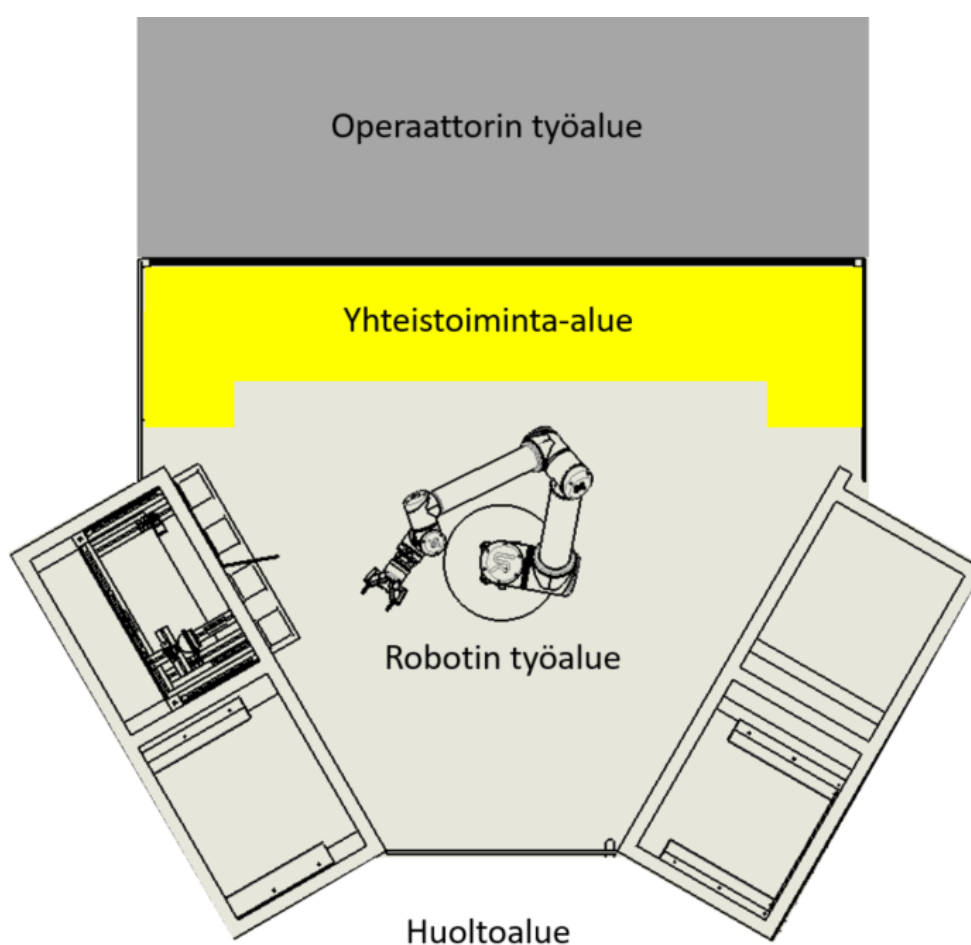
jossa 14 mm on valoverhon resoluutio, jota tässä yhteistoimintasovelluksessa suunnitellaan käytettävän.

Lopullinen suojaetäisyys voidaan laskea teknisen spesifikaation ISO/TS 15066 kaavalla 2

$$S_p(t_0) = S_h + S_r + S_s + C + Z_d + Z_r = 0,2896 \text{ m} + 0,024 \text{ m} + 0,2023 \text{ m} + 0 \text{ m} + 0 + 0 = 0,5159 \text{ m}.$$

Lopullinen suojaetäisyys on siis 0,5159 metriä. Laskuihin merkittiin tekijät  $Z_d$  ja  $Z_r$  nolliksi, sillä niitä pidettiin laskun kokonaisuuden kannalta merkityksettöminä. Vertailun vuoksi mainittakoon, että mikäli vähimmäisetaisyyden laskennassa olisi käytetty taulukosta 4 löytyvää 1 m/s nopeudelle annettua pysähtymisaikaa 450 ms, olisi suojaetäisyydeksi muodostunut noin 1,25 metriä. Suojaetäisyyttä saatiin siis lyhennettyä noin 0,7 metriä, millä on huomattava vaikutus yhteistoimintasolun pohjapiirustukseen.

Kuvassa 17 esitetään nopeuden ja vähimmäisetäisyyden valvontaan perustuva yhteistoimintasolu. Robotin työalue on merkitty harmaalla, yhteistoiminta-alue keltaisella, operaattorin työalue tummemmalla harmaalla ja huoltoaluelle ja prosessin tarkkailulle varattu alue on solun ympärille jäävää tilaa. Robotin työalue rajautuu huoltoalueesta suojaidoilla sekä turvaporilla, joka on varustettu lukittavalla turvarajakytkimellä. Ihmiset voivat liikkua huoltoalueella robotin liikkuesssa. Robotin työalueen ja yhteistoiminta-alueen välillä ei ole fyysisiä esteitä tai optisia turvalaitteita, vaan yhteistoiminta-alueelle siirtymistä valvotaan robotin omalla turvaohjaimella. Yhteistoiminta-alueen ja operaattorin työalueen välillä puolestaan käytetään valoverhoja optisena turvalaitteena ihmisen sijainnin valvontaan.



**Kuva 17.** Nopeuden ja vähimmäisetäisyyden valvontaan perustuva yhteistoimintasolu.

Yhteistoimintasovellussuositukselle suoritettiin riskiarvio perustuen standardiin SFS-EN ISO 12100, joka määrittää koneiden yleisen riskinarviointi- ja pienennysprosessin. Riskinarviointiprosessin tukena käytettiin standardien SFS-EN ISO 10218-2 ja SFS-EN ISO 13857 sekä teknisen spesifikaation ISO/TS 15066 tarjoamaa tietoa. Riskin

suuruuden arviointiin käytettiin teknisessä raportissa ISO/TR 14121-1 esitettyä riskigraafia. Riskiarvion suorittamista harkittiin myös Hazard Rating Number-menetelmällä, mutta aiempien käyttökokemusten vuoksi menetelmäksi päädyttiin valitsemaan riskigraafi. Teho- ja voimarajoitetun robotin käyttämisestä johtuen yhteistoimintasovellus on luonnostaan varsin turvallinen, joten riskigraafin kaltaisella suurpiirteisellä työkalulla työskenneltäessä riskien välille on haastavaa saada merkittäviä eroja.

Ensimmäinen riskien arviointiprosessin työvaihe oli riskien tunnistaminen. Riskejä tunnistettiin yhteensä viisi kappaletta, joista kaikki olivat luonteeltaan törmäyksiä tai puristumisia. Osa riskeistä sijaitsee yhteistoiminta-alueella, mutta suurin osa riskeistä liittyy robotin työalueella tehtäviin erilaisiin ylläpito- ja huoltotoimenpiteisiin. Riskejä löydettiin kokonaisuudessaan varsin vähän, sillä ehdotetussa yhteistoimintasolussa turvallisuus on huomioitu jo suunnitteluvaiheessa eristämällä vaaran aiheuttaja suurimmaksi osaksi suoja-aitojen taakse. Riskien arviointiprosessin aikana tunnistetut vaarat esitetään taulukossa 6.

**Taulukko 6. Riskien arviointiprosessin aikana tunnistetut vaarat.**

<b>Viite Nro.</b>	<b>Elinkaari</b>	<b>Tehtävä ISO 12100:2010 taulukko B.3</b>	<b>Vaaravyöhyke</b>	<b>Vaara ISO 12100:2010, taulukko B.1</b>	<b>Vaaratilanne</b>	<b>Vaarallinen tapahtuma</b>
<b>1</b>	Käyttötoiminta	Käsin tehtävä syöttäminen tai purkaminen	Yhteistoiminta-alue	Sormien tai käden puristuminen	Työskentely yhteistoiminta-alueella	Operaattorin käsi puristuu tarjottimen ja tuotteen väliin robotin asettaessa tuotetta yhteistoiminta-alueelle
<b>2</b>	Käyttötoiminta	Käsin tehtävä syöttäminen tai purkaminen	Yhteistoiminta-alue	Sormien puristuminen	Työskentely yhteistoiminta-alueella	Operaattorin sormet puristuvat tuotteen ja tarttujan sormien väliin robotin noutaessa tuotetta yhteistoiminta-alueelta
<b>3</b>	Ongelman selvitys	Palauttaminen tukkeumista	Robotin työalue	Törmäys tai puristuminen	Työskentely robotin työalueella	Huoltomies poistaa virheellisesti asetettua tuotetta prosessilaitteesta ja robotti käynnistyy yllättäen
<b>4</b>	Kunnossapito	Säätäminen, huoltaminen	Robotin työalue	Törmäys tai puristuminen	Työskentely robotin työalueella	Huoltomies tekee ylläpitoon liittyviä töitä ja robotti käynnistyy yllättäen
<b>5</b>	Kunnossapito	Säätäminen, huoltaminen	Robotin työalue	Törmäys tai puristuminen	Työskentely robotin työalueella	Robotti törmää huoltomieheen robotin ohjelmoinnin yhteydessä

Vaarojen tunnistamisen jälkeen siirryttiin tekemään riskien suuruuden arviointia riskigraafia käyttämällä. Kaikki riskit olivat suuruudeltaan varsin pieniä jo ennen varsinaisia riskien pienennystoimenpiteitä, sillä yhteistoimintasovelluksessa käytettävä robotti on luontaisesti turvallinen teho- ja voimarojoitettu robotti. Taulukossa 7 esitetään riskien arviointiprosessin aikana arvioidut riskien suuruudet ja riskien pienentämiseksi tehdyt toimenpiteet. Riskiä numero 5, eli robotin törmäämistä huoltomieheen robotin ohjelmoinnin yhteydessä, pidettiin epätodennäköisenä ja vaikutukseltaan vähäisenä. Tästä huolimatta robotin ohjelmointilaite suositellaan varustettavan 3 asentoisella sallintakytkimellä.



**Taulukko 7.** Riskien arviointiprosessin havaittu arvioitu riskin suuruus, riskin pienentämiseksi tehtyt toimenpiteet sekä jäännösriskin suuruus.

Viite Nro.	Vaarallinen tapahtuma	Riskin suuruuden arviointi (alkuperäinen riski)					Riskin pienentäminen	Riskin suuruuden arviointi (riskin pienentämisen jälkeen)					Onko riski hyväksyttävä?
		S	F	O	A	RI		S	F	O	A	RI	
1	Operaattorin käsi puristuu tarjottimen ja tuotteen väliin robotin asettaessa tuotetta yhteistoiminta-alueelle	S2	F1	O2	A1	2	Käytetään yhteistoiminta-alueen suojaetäisyytenä teknisen spesifikaation ISO/TS 15066 mukaan määritettyä arvoa	S1	F1	O2	A1	1	Kyllä
2	Operaattorin sormet puristuvat tuotteen ja tarttujan sormien väliin robotin noutaessa tuotetta yhteistoiminta-alueelta	S1	F2	O3	A1	2	Käytetään yhteistoiminta-alueen suojaetäisyytenä teknisen spesifikaation ISO/TS 15066 mukaan määritettyä arvoa	S1	F2	O3	A1	2	Kyllä
3	Huoltomies poistaa virheellisesti asetettua tuotetta prosessilaitteesta ja robotti käynnistyy yllättäen	S2	F1	O2	A1	2	Robotti suorittaa turvaluokitellun valvotun pysähdysten turvaportin avauksen yhteydessä, ennen kuin operaattori voi siirtyä robotin työalueelle	S2	F1	O1	A1	2	Kyllä
4	Huoltomies tekee ylläpitoon liittyviä töitä ja robotti käynnistyy yllättäen	S2	F1	O2	A1	2	Huoltotoimenpiteitä varten robotista katkaistaan virta ja vahinkokäynnistys estetään lukittavalla turvakytkimellä.	S2	F1	O1	A1	2	Kyllä
5	Robotti törmää huoltomieheen robotin ohjelmoinnin yhteydessä	S2	F1	O2	A1	2	Robotin ohjelmointilaitte varustetaan jälkiasenteisella 3 asentoisella sallintakytkimellä	S2	F1	O1	A1	2	Kyllä

### 5.3 Yhteistoimintasovelluksen hyötyjen arviointi

Yhteistoimintasovellus mahdollistaa Vaisalan tuotantovaiheessa tuotteiden kokoonpanon tapahtumisen aivan robotin työalueen laidalla, jolloin kokoonpanun tuotteen siirtäminen robotille on sujuvaa. Myös valmistuneiden tuotteiden siirtäminen seuraavaan työvaiheeseen on vaivatonta. Yhteistoimintasovellus mahdollistaa robotin lähes häiriintymättömän toiminnan samalla, kun operaattori toimii sen välittömässä läheisyydessä. Robotin liikkumiseen kuluvan ajan selvittämiseen käytettiin simulaatiomallia, joka tehtiin Visual Componentsin ohjelmistolla. Simulointimalli rakennettiin vastaamaan toiminnaltaan ehdotuksen mukaista robottisolua. Simulointimallilla saatiin selville karkea tahtiaika-arvio, johon robotti ominaisuuksiensa puolesta pystyy. Simulointimallilla ei kuitenkaan pystytty arvioimaan tuotteen prosessilaitteeseen asettamiseen kuluvaa aikaa, vaan tähän tarkoitukseen tarvittiin

oikealla robotilla tehtyjä mittauksia. Tuotteen prosessilaitteeseen asettamiseen kuluvan ajan selvittäminen oli haastavaa, sillä tuotteen asettaminen on tehtävä varovasti voima-anturilla tunnustellen. Tämä tarkoittaa maltillisten kiihtyvyyksien ja alhaisien nopeuksien käyttämistä. Asetukseen kuluva aikaa pyrittiin pienentämään käyttämällä hyödyksi videokuvausta, jonka avulla tuotteen käyttäytymistä asetuksen aikana päästiin tarkastelemaan. Tämän jälkeen asettamiseen kuluva aika kelloitettiin ja yhdistettiin simulaatiomallin tietoihin lopullisen tahtiaika-arvion saamiseksi. Alustavien mittausten ja simulointien perusteella voidaan ihmisen ja robotin yhteistyön arvioida nostavan kapasiteettia noin 30 prosentilla, kun vertailuarvona käytetään keskimääräistä työntekijän työtahtia.

## **5.4 Yhteistoimintasovelluksen suunnittelun haasteet**

Haddadin (2013) mukaan ainoa standardisoitu ohjeistus ihmisen ja robotin väliseen törmäykseen liittyen on standardissa SFS-EN ISO 10218:2006 annetut teho- ja voimamarajat, jotka olivat 80 W ja 150 N (Haddadin 2013). Nämä arvot eivät kuitenkaan enää ole voimassa, sillä ne poistettiin vuonna 2011 julkaistusta standardista. Tällä hetkellä ihminen-robotti yhteistoimintasovelluksen suunnitteluun antaa ohjeistusta yksi C-tason standardi, joka on SFS-EN ISO 10218-2. Vuonna 2016 julkaistiin tekninen spesifikaatio ISO/TS 15066, joka toi kaivattua tarkennusta yhteistoimintatapoihin sekä niiden turvallisuuteen. Kyseessä on kuitenkin vasta tekninen spesifikaatio, jonka muuttuminen standardiksi tulee todennäköisesti kestämään vielä useita vuosia.

Nopeuden ja vähimmäisetäisyyden valvontaan perustuvan yhteistoimintasovelluksen suunnittelu on suoraviivaista ja siihen on tarjolla paljon ohjeistusta. Tehon ja voiman rajoitukseen perustuvan yhteistoimintasovelluksen suunnitteluun liittyy kuitenkin tällä hetkellä vielä paljon kysymysmerkkejä. Robotin ja ihmisen välisen törmäyksen voima- ja painetasojen määrittämiseen ei ole standardisoitua mittaustapaa. Ei ole myöskään olemassa standardisoituja vertailuarvoja, joihin mittaustuloksia voisi verrata. Tehon ja voiman rajoitukseen perustuvien yhteistoimintasovelluksien suunnittelijat voivat kuitenkin teknisen spesifikaation ohjeistusta noudattaessaan todeta suunnittelun pohjautuvan tämän hetkiseen parhaaseen ohjeistukseen.

## **5.5 Tutkimuksen toteutuksen arviointi ja tutkimustavoitteiden täyttyminen**

Työssä tehty kirjallisuustutkimus antoi laajan pohjatiedon yhteistoimintasovelluksen suunnittelun ja yhteistoimintatavan valinnan tueksi. Kokeellisen tutkimuksen ja matemaattisen mallintamisen avulla saatujen tuloksien avulla pystyttiin tekemään päätös Vaisalan tuotantovaiheeseen soveltuvasta yhteistoimintatavasta ja laatimaan ehdotus yhteistoimintasolusta. Lisäksi työn aikana kertyi paljon tulevaisuuden kannalta hyödyllistä tietoa tehon ja voiman rajoitukseen perustuvan yhteistoimintasovelluksen

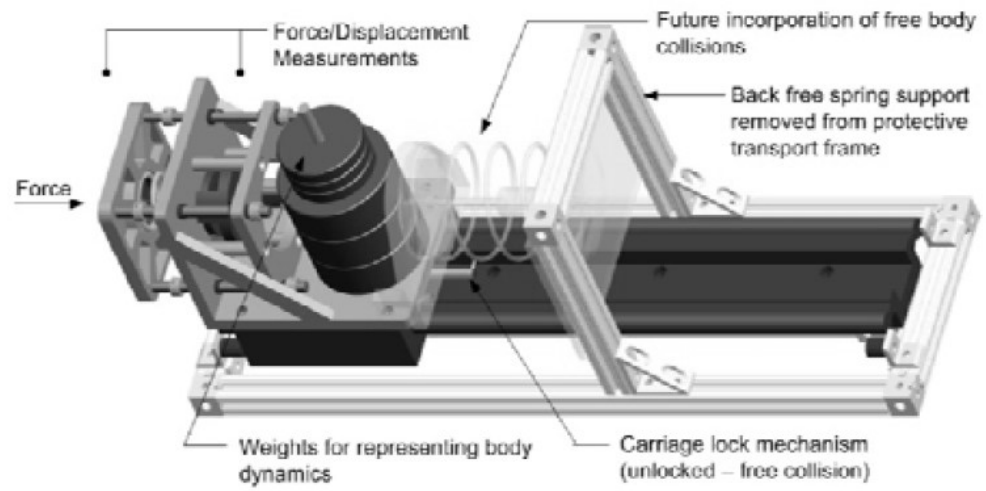
hyödyistä ja haitoista. Tätä tietoa Vaisalassa voidaan hyödyntää tulevissa automaatioprojekteissa. Tehdyn diplomityön voidaankin katsoa saavuttaneen alkuvaiheilla asetetun päätavoitteen.

Kokeellisessa tutkimuksessa mittaukset tehtiin itserakennetulla mittauslaitteella, mikä vähentää tulosten luotettavuutta. Mittauslaitteen rakennuksessa kuitenkin seurattiin DGUV:n ohjeistusta, joten tuloksia voidaan pitää käyttötarkoitukseensa riittävän tarkkoina. Kokeellisen tutkimuksen aikana tehtiin päätös, että puristusta aiheuttamatonta törmäystilannetta ei tulosten analysoinnin yhteydessä tehtyä maksiminopeuden laskentaa lukuunottamatta tutkita lainkaan. Tähän tarkoitukseen soveltuvan mittauslaitteen rakentaminen olisi kuitenkin lisännyt kokeellisen tutkimuksen syvyyttä ja antanut lisätietoa yhteistoimintatavan valinnan tueksi. Matemaattisessa mallinnuksessa hyödynnettiin robotin valmistajan vuonna 2014 tekemien pysähtymisaikamittausten tuloksia. Mittaukset on tehty robotin vanhemmalla versiolla, joten robotin pysähtymisuorituskyky on kehityksen myötä saattanut parantua. Mikäli muodostettua mallia olisi testattu, olisi mallin luotettavuus lisääntynyt. Lisäksi mallia olisi testaustulosten avulla pystytty mahdollisesti kehittämään tarkemmaksi.

## 5.6 Jatkotutkimuskohteet

Ihmisen ja robotin väliseksi suojaetäisyydeksi yhteistoiminta-alueella määritettiin noin puoli metriä. Suojaetäisyyttä on mahdollista saada vieläkin lyhyemmäksi, sillä nykyinen pysähtymisaika perustuu tilanteeseen, jossa ensimmäinen nivel liikkuu täydellä nopeudella. Yhteistoiminta-alueella tällaista tilannetta ei ole, joten suojaetäisyys on edelleen ylimitoitettu. Tilan säästämiseksi robotille olisi tärkeää saada määritettyä pysähtymisaika myös alle 1000 mm/s nopeuksille, sillä karkealla tasolla voidaan todeta, että nopeuden puolittuessa myös pysähdykseen vaadittava aika puolittuu (Salmi et al. 2016). Tässä työssä robotin pysähtymissuorituskykyä määritettiin mallintamalla, mutta tarkempien tuloksien saamiseksi robotin pysähtymissuorituskyvyn mittaaminen olisi tarpeellista.

Mikäli tulevaisuudessa ohjeistuksen kehittyessä tämä yhteistoimintasovellus muutetaan perustumaan tehon ja voiman rajoitukseen, olisi tärkeää pystyä mittaamaan myös puristusta aiheuttamattomia törmäyksiä. Tämän projektin aikana rakennettu törmäysmittalaite soveltuu puristustilanteen aiheuttavien törmäystilanteiden mittaamiseen. Puristusta aiheuttamattomien törmäysten mittaamiseen laite ei kuitenkaan sovellu. Mikäli puristusta aiheuttamattomien törmäyksien testaukseen käytettäisiin liukukelkkaa, tulisi turvajärjestelmiä testattua todenmukaisemmin. Falco et al. (2012) esittää tutkimuksessaan puristusta aiheuttamattomien törmäysten mittaukseen tarkoitetun testilaitteiston, joka on esitetty kuvassa 18. Törmäyskelkkaan voidaan asentaa teknisen spesifikaation ISO/TS 15066 mukaisesti ihmisen eri ruumiinosien efektiivistä massaa vastaava määrä painoja.



**Kuva 18.** Puristusta aiheuttamattoman törmäystilanteen tutkimiseen käytettävä törmäyskelkka (Falco et al. 2012).

## 6. YHTEENVETO

Työn kokeellisessa osiossa tehtyjen törmäystestimittausten mukaan UR10-robotin liikenopeus on asetettava nopeuksien 100 mm/s - 200 mm/s väliin, mikäli liikkeen aikana on riski puristusta aiheuttavaan törmäykseen ja yhteistoimintasovellus perustuu tehon ja voiman rajoitukseen. Kokeellisessa osiossa laskettiin myös UR10-robotille uudet pysähtymisajat, jonka ansiosta nopeuden ja vähimmäisetäisyyden valvontaan perustuvan yhteistoiminnan suojaetäisyysvaatimusta saatiin lyhennettyä noin 700 millimetrillä, millä on suuri vaikutus yhteistoimintasovelluksen pohjapiirustuksen muodostumiseen.

Vaisalan yhteistoimintasovellukseen valittiin yhteistoimintatavaksi nopeuden ja vähimmäisetäisyyden valvonta. Tämä valinta huomioiden Vaisalalle suunniteltiin ehdotus yhteistoimintasolusta, jossa robotilla ja ihmisellä on molemmilla omat työalueet yhteistoiminnan rajoittuessa ainoastaan yhteistoiminta-alueelle.

Yhteistoimintasovelluksiin tarkoitettuja SFS-EN ISO 10218-1 mukaisia teho- ja voimarajoitettuja robotteja markkinoidaan monesti turvallisina. Ihmisen läheisyydestä johtuen tehon ja voiman rajoitukseen perustuvien yhteistoimintasovellusten turvallisuus tulee kuitenkin ottaa vakavasti, eikä robotin turvatoimintoihin pidä luottaa varauksetta. Tämän projektin kokemusten perusteella tehon ja voiman rajoitukseen perustuvan yhteistoimintasovelluksen toteuttaminen on mahdollista, mutta työlästä. Tällä hetkellä ei ole olemassa standardisoitua voiman- ja paineenmittaustapaa, eikä myöskään standardisoituja voima- ja painearvoja, joihin saatuja mittaustuloksia voitaisiin verrata. Tekninen spesifikaatio ISO/TS 15066 antaa suuntaa antavia suosituksia sallituista paine- ja voimatasoista, mutta projektin aikana tehtyjen havaintojen perusteella kestää kuitenkin vielä useita vuosia, että tekninen spesifikaatio muuttuu standardiksi. Diplomityöprojektin kokemusten mukaan lähiaikoina eniten teollisuudessa käytettävä yhteistoimintatapa tulee olemaan nopeuden ja vähimmäisetäisyyden valvonta. Teho- ja voimarajoitetuille roboteille löytyy valmistavassa teollisuudessa paikkansa, mutta oikeasti hyödyllisten sovellusten suunnittelu vaatii kekseliäisyyttä.

## LÄHTEET

Ajoudani, A., Zanchettin, A.M., Ivaldi, S., Albu-Schäffer, A., Kosuge, K. & Khatib, O. (2018). Progress and prospects of the human–robot collaboration, *Autonomous Robots*, Vol. 42(5), pp. 957-975. Available (accessed 11.5.2018): <https://doi.org/10.1007/s10514-017-9677-2>.

Bley, H., Reinhart, G., Seliger, G., Bernardi, M. & Korne, T. (2004). Appropriate Human Involvement in Assembly and Disassembly, *CIRP Annals*, Vol. 53(2), pp. 487-509. Available (accessed 5.1.2018): <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607600262>.

Collaborative robot systems, (2017). German Social Accident Insurance, Germany, 8 p. Available: [http://www.dguv.de/medien/fb-holzundmetall/publikationen-dokumente/infoblaetter/infobl\\_englisch/080\\_collaborativerobotsystems.pdf](http://www.dguv.de/medien/fb-holzundmetall/publikationen-dokumente/infoblaetter/infobl_englisch/080_collaborativerobotsystems.pdf).

De Santis, A., Siciliano, B., De Luca, A. & Bicchi, A. (2008). An atlas of physical human–robot interaction, *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 43(3), pp. 253-270. Available (accessed 10.5.2018): <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094114X07000547>.

Design of workplaces with collaborative robots, (2011). BGIA – Institute for Occupational Safety and Health of the German Social Accident Insurance, Germany, Available: [http://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/bg\\_bgia\\_empf\\_u\\_001e.pdf](http://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/bg_bgia_empf_u_001e.pdf).

Elprama, S.A., Jewell, C.I.C., An, J., El Makrini, I. & Vanderborght, B. (2017). Attitudes of Factory Workers towards Industrial and Collaborative Robots, Vienna, Austria, March 06 - 09, 2017, ACM, New York, NY, USA, pp. 1-2.

Falco, J.A., Marvel, J.A. & Norcross, R.J. (2012). Collaborative Robotics: Measuring Blunt Force Impacts on Humans, 11.10.2012, National Institute of Standards and Technology, pp. 6.

Fryman, J. & Matthias, B. (2012). Safety of Industrial Robots: From Conventional to Collaborative Applications, ROBOTIK 2012; 7th German Conference on Robotics, pp. 1-5.

Haddadin, S., Albu-Schäffer, A. & Hirzinger, G. (2009). Requirements for safe robots: measurements, analysis and new insights, 11-12 p.

Haddadin, S. (2013). *Towards Safe Robots: Approaching Asimov's 1st Law*, Springer Berlin Heidelberg,

Harpur, H. (2012). RR906 - Collision and injury criteria when working with collaborative robots, HSE, Buxton, 42 p. Available: <http://www.hse.gov.uk/research/rrhtm/rr906.htm>.

- Heinzmann, J. & Zelinsky, A. (2003). Quantitative Safety Guarantees for Physical Human-Robot Interaction, *The International Journal of Robotics Research*, Vol. 22 pp. 479-504.
- Helms, E., Schraft, R.D. & Hagele, M. (2002). rob@work: Robot assistant in industrial environments, *Proceedings.11th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication*, Berlin, Germany, September 25-27, 2002, IEEE, pp. 399-404.
- Hirsjärvi, S., Remes, P., Sajavaara, P. & Sinivuori, E. (2009). Tutki ja kirjoita, 15. uud. p. ed. Tammi, Helsinki, 464 sivua p.
- Hirzinger, G., Sporer, N., Albu-Schaffer, A., Hahnle, H., Krenn, R., Pascucci, A. & Schedl, M. (2002). DLR's torque-controlled light weight robot III-are we reaching the technological limits now? *Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.02CH37292)*, pp. 1716 vol.2.
- Hägele, M., Schaaf, W. & Helms, E. (2002). Robot Assistants at Manual Workplaces: Effective Co-operation and Safety Aspects; *Proceedings of the 33rd ISR*, October 7-11, 2002, Fraunhofer Institute for Manufacturing, Stuttgart, pp. 1-6.
- ISO/TS 15066 (2016). Robots and robotic devices — Collaborative robots, ISO, Geneva, Switzerland,
- Jocelyn, S., Burlet-Vienney, D. & Giraud, L. (2017). Experience Feedback on Implementing and Using Human-Robot Collaboration in the Workplace, *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, Vol. 61(1), pp. 1690-1694. Available (accessed doi: 10.1177/1541931213601911; 19): <https://doi.org/10.1177/1541931213601911>.
- Kirchner, E.A., de, G.F., Kampmann, P., Schröer, M., Metzen, J.H. & Kirchner, F. (2015). Intuitive Interaction with Robots – Technical Approaches and Challenges, in: Drechsler, R. & Kühne, U. (ed.), *Formal Modeling and Verification of Cyber-Physical Systems: 1st International Summer School on Methods and Tools for the Design of Digital Systems*, Bremen, Germany, September 2015, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, pp. 224-248.
- Krüger, J., Lien, T.K. & Verl, A. (2009). Cooperation of human and machines in assembly lines, *CIRP Annals*, Vol. 58(2), pp. 628-646. Available (accessed 3.2.2018): <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850609001760>.
- Kühnrich Morten CB3 Stop performance, Universal Robots, web page. Available (accessed 14.9.2017): <https://www.universal-robots.com/how-tos-and-faqs/faq/ur-faq/cb3-stop-performance-17740/>.
- Lasota, P., Fong, T. & Shah, J.,A. (2017). A Survey of Methods for Safe Human-Robot Interaction, 261-349 p.
- Luca, A.D., Albu-Schaffer, A., Haddadin, S. & Hirzinger, G. (2006). Collision Detection and Safe Reaction with the DLR-III Lightweight Manipulator Arm, 2006 IEEE/RSJ

International Conference on Intelligent Robots and Systems, Beijing, China, October 9-15, 2006, pp. 1623-1630.

Luke, H.D. (1999). The origins of the sampling theorem, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 37(4), pp. 106-108.

Marvel, J.A. & Norcross, R. (2017). Implementing speed and separation monitoring in collaborative robot workcells, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 44 pp. 144-155. Available (accessed 15.12.2017): <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0736584516302617>.

Muttray, A., Melia, M., Geißler, B., König, J. & Letzel, S. (2014). Research project No. FP-0317: Collaborative robots – Investigation of pain sensibility at the Man-Machine-Interface, Institute for Occupational, Social and Environmental Medicine at the Johannes Gutenberg University of Mainz, Germany, Available: [http://www.dguv.de/projektdatenbank/0317/wissenschaftlicher\\_schlussbericht\\_final\\_18.12.2014.pdf](http://www.dguv.de/projektdatenbank/0317/wissenschaftlicher_schlussbericht_final_18.12.2014.pdf).

Optoforce HEX-E datasheet, (2018). Optoforce, Available: <https://optoforce.com/downloads>.

Pilz PSEN op4F, (2018). Pilz GmbH & Co. KG, Available: <https://www.pilz.com/eshop/pdfDownload?areaId=568126F2110F0AE0E1008000AC10CF6C&itemId=568126F2110F0AE0E1008000AC10CF6C49BA53EA3F4400AAE1008000AC10CF66>.

Pohjolainen, S. (2010). *Matemaattinen mallinnus*, WSOYpro, Helsinki, 272 sivua p.

Rosenstrauch, M.J. & Krüger, J. (2017). Safe human-robot-collaboration-introduction and experiment using ISO/TS 15066, 2017 3rd International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR), pp. 740-744.

Salmi, T., Väättäin, O., Malm, T., Montonen, J. & Marstio, I. (2014). *Meeting New Challenges and Possibilities with Modern Robot Safety Technologies*, Springer International Publishing, Cham, pp. 183-188.

Salmi, T., Marstio, I., Malm, T. & Montonen, J. (2016). Advanced safety solutions for human-robot-cooperation, *Proceedings of ISR 2016: 47st International Symposium on Robotics*, pp. 1-6.

Schraft, R.D., Meyer, C., Parlitz, C. & Helms, E. (2005). PowerMate-A Safe and Intuitive Robot Assistant for Handling and Assembly Tasks, *Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Barcelona, Spain, April 2005, IEEE, pp. 4074-4079.

Schunk, Schunk, web page. Available (accessed 25.1.2018): [https://schunk.com/de\\_en/co-act/#c38404](https://schunk.com/de_en/co-act/#c38404).



SFS ry (2015). Koneturvallisuuden standardit, Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, Helsinki, 12 p. Available:  
<https://www.sfs.fi/files/63/Koneturvallisuusesite2015web.pdf>.

SFS-EN 60204-1 (2006). Koneturvallisuus. Koneiden sähkölaitteisto. Osa 1: Yleiset vaatimukset, Suomen standardisoimisliitto SFS, Helsinki,

SFS-EN ISO 10218-1 (2011). Robots and robotic devices. Safety requirements for industrial robots. Part 1: Robots, Suomen standardisoimisliitto, Helsinki,

SFS-EN ISO 10218-2 (2011). Robots and robotic devices. Safety requirements for industrial robots. Part 2: Robot systems and integration, Suomen standardisoimisliitto, Helsinki,

SFS-EN ISO 13855 (2010). Safety of machinery – Positioning of safeguards with respect to the approach speeds of parts of the human body, Suomen standardisoimisliitto,

Universal Robots Safety FAQ, Universal Robots, web page. Available (accessed 25.2.2018): <https://www.universal-robots.com/how-tos-and-faqs/faq/ur-faq/safety-faq-17750/>.

User manual UR10 CB3, (2018). Universal Robots A/S, 179 p. Available:  
<https://www.universal-robots.com/download/?option=32463#section32450>.

Yamada, Y., Hirasawa, Y., Huang, S.Y. & Umetani, Y. (1996). Fail-safe human/robot contact in the safety space, Robot and Human Communication, 1996., 5th IEEE International Workshop on, pp. 59-64.